VERIFICAREA EXPERIMENTALĂ A LEGII LUI STEFAN-BOLTZAMNN

1. Scopul lucrării

Scopul lucrării este acela de a studia radiația termică care reprezintă o sursă ecologică şi inepuizabilă de energie (vezi de exemplu Soarele). Se verifică legea lui Stefan-Boltzmann pentru energia radiantă cu ajutorul unui stand experimental inedit, sursa radiantă fiind reprezentată de un bec. Se va măsura intensitatea şi tensiunea electrică, determinându-se apoi puterea şi temperatura. Se va evalua grafic respectarea legii lui Stefan-Boltzmann determinându-se panta dreptei lnP=*f*(lnT), a cărei valoare trebuie să fie aproximativ 4.

2. Considerații teoretice

Toate corpurile emit şi absorb energie din/sau în mediul înconjurător sub forma de radiație electromagnetică. Această radiație electromagnetică depinde de natura corpurilor astfel, de exemplu, gazele prezintă un spectru de emisie discontinuu deci se obțin numai anumite frecvențe caracteristice; lichidele prezintă un spectru sub formă de benzi deci sunt observabile domenii de frecvențe diferite, iar corpurile solide au un spectru continuu şi se observă toate frecvențele. Datorită oscilațiilor sarcinilor elementare care se găsesc în toate corpurile aflate la o temperatură mai mare de zero Kelvin acestea emit radiații electromagnetice. O astfel de radiație se numeşte **radiație termică**, are un spectru continuu, este nepolarizată, iar spectrul acesteia depinde numai de tempratura la care se găseşte corpul radiant şi nu depinde de natura acestuia.

S-a demonstrat experimental că puterea de emisie şi cea de absorbție diferă de la un corp la altul, dar raportul lor este o expresie universală care depinde doar de temperatura corpului şi de lungimea de undă (frecvența) a radiației, expresie numită *funcția de distribuție a lui Planck* (vezi Fig. 1).

Un corp total absorbant, respectiv total emisiv se numeşte corp negru. O incintă încălzită electric emite printr-un orificiu o radiație ce poate fi aproximată cu cea emisă de un corp negru. *Densitatea spectrală de energie* emisă de un corp negru, ρ, adică energia dW emisă în unitatea de volum dV într-un domeniu spectral dν este chiar funcția lui Planck:

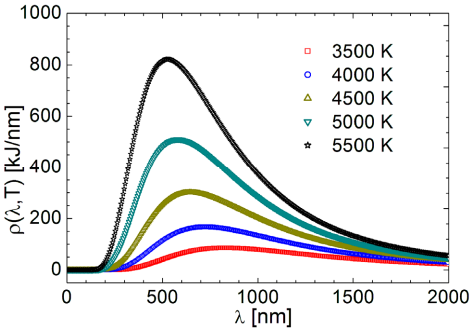

Figura 1.

$$\rho(\nu,T)=\frac{1}{dV}\frac{dW}{d\nu}=\frac{8\pi h\nu^3}{c^3}\cdot\frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}}-1}, \quad (1)$$

sau în funcție de lungimea de undă:

$$\rho(\lambda,T)=\frac{8\pi hc}{\lambda^5}\cdot\frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}}-1}, \quad (2)$$

unde $c=3\times10^8$ m/s este viteza luminii (sau în general viteza undelor electromagnetice), $k=1.38\times10^{-23}$J/K este constanta lui Boltzmann, iar h este constanta lui Planck. Aceasta din urmă, cuantifică energia oscilatorilor microscopici în sensul că energia se emite şi se absoarbe de către aceştia în *cuante* (cantități discrete de energie) cu valoarea $E = h \cdot \nu$, numite fotoni. Cuantificarea energiei câmpului electromagnetic, a fenomenelor de emisie şi de absorbție a energiei, prin constanta lui Planck sunt descoperiri fundamentale pentru înțelegerea proceselor fizice care au loc la scară microscopică.

Energia radiației emise de un corp în unitatea de timp, pe unitatea de suprafață, se numeşte **radianță spectrală** $\mathcal{R}$:

$$[\mathcal{R}] = \frac{[\text{energie}]}{[\text{timp}] \cdot [\text{suprafata}]} = \frac{J}{s \cdot m^2} = \frac{W}{m^2}. \tag{3}$$

Expresia radianței spectrale pentru un corp negru se obține cu ajutorul legii de distribuție a lui Planck conform relației:

$$\mathcal{R} = \int_0^\infty \rho(\nu, T) d\nu = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2h^3} T^4 = \sigma T^4 \Rightarrow R = \sigma T^4. \tag{4}$$

Această lege se numeşte legea lui Stefan-Boltzmann, iar $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$ este constanta lui Stefan-Boltzmann. Aceasta este o lege de conversie a energiei de agitație termică, evaluată de temperatura absolută, în energie electromagnetică evaluată de radiația spectrală: energia electromagnetică emisă de un corp negru depinde doar de puterea a patra a temperaturii sale absolute.

Pentru corpurile care nu sunt absolut negre formula se corectează cu un factor subunitar **ε** numit emisivitate care depinde de natura corpului emisiv:

$$\mathcal{R} = \varepsilon \sigma T^4. \tag{5}$$

Schimbul de energie dintre un corp încălzit şi mediul înconjurător se realizează în general în trei moduri: prin conducție, prin convecție şi prin radiație. În anumite condiții, cum ar fi o bună izolare a corpului încălzit şi o temperatură relativ ridicată a acestuia, energia disipată prin conducție şi convecție poate să fie neglijată în raport cu energia pierdută prin radiație. Aceste condiții sunt îndeplinite de filamentul unui bec aflat la temperaturi mai mari ca 800°C. Puterea electrică consumată de bec $P = U \cdot I$, este disipată aproape integral sub forma de radiație electromagnetică, astfel $\mathcal{R} = P/S$ radianța spectrală fiind tocmai puterea emisă de unitatea de suprafață pentru care avem relatia:

$$P = UI = \mathcal{R}S = \varepsilon \sigma S\left(T^4 - T_0^4\right) = K\left(T^4 - T_0^4\right), \tag{6}$$

unde T este temperatura filamentului, T_0 este temperatura mediului ambiant, ε – emisivitatea filamentului, S – suprafața filamentului, iar $K = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S$ este o

constantă a experimentului. Pentru temperaturi mai mari ca 800°C se îndeplineşte condiția $T>>T_0$ şi relația de mai sus devine:

$$P = U \cdot I = K \cdot T^4 , \tag{7}$$

prin logaritmare obținem:

$$\ln P = \ln K + 4 \cdot \ln T . \tag{8}$$

Prin reprezentarea grafică a lui lnP în funcție de lnT se obține o dreaptă a cărei pantă are valoarea 4, ceea ce reprezintă o verificare a legii lui Stefan-Boltzmann.

3. Aplicații

Aşa cum am arătat anterior orice corp aflat la o temperatură mai mare de 0 K emite radiații electromagnetice. La temperaturile obişnuite maximul funcției de distribuție al energiei radiante se găseşte în domeniul radiației infraroşii şi doar o parte extrem de mică din această radiație se găseşte în domeniul vizibil. De aceea radiația emisă de corpurile aflate la temperatura camerei este invizibilă pentru ochiul uman. Există dispozitive care permit observarea radiației infraroşii şi o transformă în lumină vizibilă. Astfel de dispozitive pot să aibă aplicații în dispozitive de vedere pe timp de noapte aşa cum ar fi binoclurile în infraroşu.

Corpurile mamiferelor cu sânge cald emit o cantitate de radiatie IR mai mare decat corpurile înconjurătoare fapt care face ca aceste corpuri să fie extrem de bine observate prin dispozitivele de vedere nocturne. Valoarea lungimii de undă maxime a radiației electromagnetice emisă de corpuri depinde de temperatrura acestora (conform legii de deplasare a lui Wien $\lambda_{max} T = b = 2.8978 \times 10^{-3}$ mK). Acest fapt este utilizat în practică pentru a obține o scală de temperatură prin măsurarea radiației electromagnetice. Astfel de dispozitive se pot întâlnii la inginerii constructori care determină gradul de izolare al cladirilor (adică cantitatea de căldură pierdută prin radiație de către diverse construcții).

4. Metodica experimentală

4.1 Montajul experimental

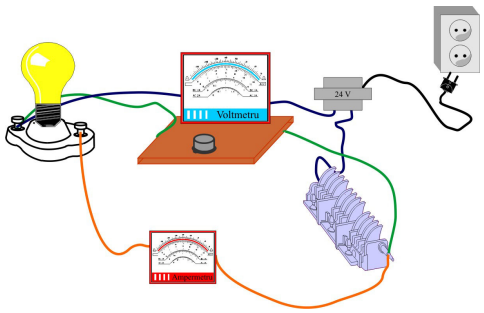

Figura 2.

Pentru verificarea legii lui Stefan-Boltzmann se foloseşte un bec de 24 V şi 0,1A, o sursă de alimentare de 24 V, un reostat, un miliampermetru şi un voltmetru, legate ca în montajul din figura alăturată. Se realizează montajul din Figura 2.

4.2 Modul de lucru

1. Se măsoară tensiunea din 2 în 2 V începând cu valoarea de 6V.

2. Pentru fiecare valoare a tensiunii electrice se măsoară valorile corespunzătoare ale intensității curentului electric.

4.3 Prelucrarea datelor

1. Se determină puterea consumată folosind relația

$$P = U \cdot I \tag{9}$$

2. Se determină rezistența filamentului cu relația:

$$R = U / I \tag{10}$$

3. Se deduce temperatura filamentului din legea variației rezistenței cu temperatura:

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t) \Rightarrow T = T_0 + \frac{R - R_0}{\alpha \cdot R_0} \tag{11}$$

unde $\alpha = 0.0053\ \text{grd}^{-1}$, $T_0 = 300\ \text{K}$, iar $R_0 = 0{,}9\ \Omega$ reprezintă rezistența la temperatura „rece" a filamentului (valorile ridicate ale temperaturii filamentului permit aceste aproximații)

4. Se completează tabelul următor:

Tabel 1

U [V]	I [A]	P [W]	ln P	R [Ω]	T [K]	ln T
6						
8						
10						
12						
14						
16						
18						
20						

5. Se reprezintă grafic $\ln P = f(\ln T)$

6. Se aleg două puncte de pe grafic (cât mai îndepărtate dar în domeniu de reprezentare), se coboară perpendicularele pe axe, iar din triunghiul dreptunghic rezultat se calculează panta graficului:

$$\frac{\Delta(\ln P)}{\Delta(\ln T)} = \frac{\ln P_2 - \ln P_1}{\ln T_2 - \ln T_1}, \tag{12}$$

şi se compară cu valoarea teoretică 4, apreciindu-se corectitudinea verificării legii lui Stefan-Boltzmann.