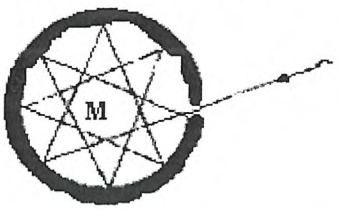
LEGEA RADIAȚIEI ȘTEFAN-BOLTZMANN

1. Radiatia electromagnetica

Orice corp din natură cu temperatura peste 0 K emite radiații în spațiu sub formă de unde electromagnetice. Energia radiantă emisă sub formă de căldură se numeşte *radiație termică.* Radiația electromagnetică poate contribui la schimbul de energie între diferite substanțe. Unele substanțe pot emite radiație, pierzând astfel energie, alte substanțe pot absorbi radiație, proces în urma căruia ele câştigă energie. Dupa ce s-a produs procesul de emisie, dar înainte de a se produce cel de absorbție, radiația electromagnetică, ea însăşi este purtătoare de energie şi deci, este susceptibilă de a fi studiată prin metode termodinamice.

In cele ce urmează, vom studia numai stările în care radiația electromagnetică se află în echilibru termic cu substanța cu care interacționează prin procesele de emisie şi absorbție.

1.1. Mărimi fizice specifice radiației



Pentru simpliate vom considera numai proprietățile radiației în vid, presupunând că radiația este într-o cavitate fără substanțe, înconjurată de pereți constituiți din substanțe emițătoare şi absorbante oarecare, aduse prin contact cu un termostat, la o temperatură electromagnetică care se propagă în toate direcțiile cu viteza *c*.

1.1.1. Intensitatea radiației

Fie M un punct oarecare în interiorul cavității şi $\vec{u}$ un vector unitate care defineşte o anumită direcție ce trece prin punctul respectiv. In jurul lui M ne imaginăm un element de suprafață ds, perpendicular pe $\vec{u}$ iar în vecinătatea vectorului $\vec{u}$ ducem toate direcțiile dintr-un unghi solid $d\Omega$

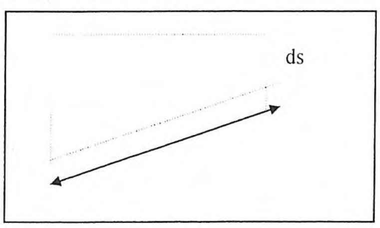
Numim "intensitatea radiației" în M şi în direcția $\vec{u}$ şi notăm cu $I(M,\vec{u})$ energia radiantă dE care trece în intervalul de timp dt prin elementul de suprafață ds şi având direcția de propagare în unghiul solid dΩ.

$$I(M,\vec{u}) = \frac{dE}{dt \cdot ds \cdot d\Omega}$$

Asadar, *Intensitatea energetică I* a unui izvor de radiații punctiform într-o direcție dată, este exprimată prin raportul dintre fluxul energetic emis şi unghiul solid elementar respectiv.La echilibru intensitatea radiației nu depinde de timp.

Dacă elementul de suprafață ds nu este perpendicular pe direcția de propagare atunci in ec.1. elementul de suprafață se înlocuieşte cu proiecția lui pe un plan perpendicular pe $\vec{u}$, deci cu $ds \cdot \cos\theta$.

1.1.2. Densitatea energiei radiante



Energia dE care traversează în timpul dt elementul de suprafață ds sub incidență oblică θ, se va găsi în cilindrul de generatoare *cdt*.

Volumul acestui cilindru va fi $c \cdot \cos\theta \cdot dt \cdot ds$ şi **densitatea de energie radiantă** cu directia de propagare în unghiul solid $d\Omega$ este egala cu energia radiantă dE

raportată la volum:

$$\frac{dE}{c \cdot \cos\theta \cdot dt \cdot dS} = \frac{I}{c}\cos\theta \qquad (2)$$

La echilibru termic I este independenta de direcție;integrând pe toate directiile de propagare, se obține densitatea totala de energie radiantă, notata cu w.

$$w(T) = \frac{I}{c}\int d\Omega = \frac{4\pi I}{c} \qquad (3)$$

In (3) am ținut seama că intensitatea I şi deci si densitatea de de energie, w, sunt funcție numai de temperatură: $w = w(T)$.

1.1.3.Presiunea radiației

Radiația electromagnetica are pe lânga energie şi impuls. Impulsul asociat unei radiații de energie *dE* este egal în mărime cu *dE/c* şi direcția vectorului impuls coincide cu direcția de propagare a radiației.

Impulsul radiației care cade în timpul dt pe elementul de suprafață *ds* este:

$$\frac{dE}{c} = \frac{I}{c}\cos\theta \cdot dt \cdot ds \cdot d\Omega \qquad (4)$$

Componenta normală la elementul de suprafață a acestui impuls se obține prin înmulțirea cu $\cos\theta$. Daca raportăm acest impuls normal la unitatea de timp şi la unitatea de suprafață se obține contribuția radiației incidente cu direcția de propagare în $d\Omega$, la presiunea radiației: $\frac{I}{c}\cos^2\theta \cdot d\Omega$

Integrând dupa unghiul solid se obține contribuția radiației incidente totale la presiune:

$$p_{inc} = \frac{2\pi I}{3c}$$

La aceasta contribuție se adaugă contribuția egală în valoare absolută datorită reculului provocat de emisia radiației dinspre perete spre cavitate. In total, deci, presiunea radiației la echilibru este:

$$p = \frac{4\pi I}{3c} = \frac{w(T)}{3} \qquad (5)$$

1.2.Legile radiatiei

La baza studiului radiațiilor emise de corpuri se află o serie de legi experimentale. Legile radiației termice sunt stabilite pentru un corp care absoarbe în totalitate radiațiile incidente. Deoarece proprietatea de a absorbi cea mai mare parte a radiațiilor incidente o au corpurile de culoare neagră (negru de platină, negru de fum), un astfel de corp absorbant integral a primit denumirea de *corp negru*.

În natură nu există corpuri absolut negre, deci perfect absorbante.

În laborator se poate crea un corp negru sub forma unei incinte sferice înnegrite pe suprafața interioară şi având un mic orificiu prin care pot pătrunde radiațiile. Când o radiație pătrunde în această incintă, suferă reflexii multiple şi la fiecare reflexie este parțial absorbită. După un număr suficient de mare de reflexii, se poate spune că radiația a fost complet absorbită. În acest fel se realizează practic un corp negru (Fig. 1).

Pe scurt, se poate spune:

Cantitatea de energie radiată pentru o anumită lungime de undă, de suprafaţa unitate a unui unui corp cu temperatura T, in unitatea de timp, reprezintă puterea de emisie – e_T a corpului respectiv.

Puterea de emisie depinde atât de natura şi temperatura absolută a corpului cât şi de lungimea de undă a radiaţiei emise.

Un corp absoarbe parţial şi reflectă parţial radiaţia incidentă. Mărimea care exprimă fracţiunea de energie absorbită se numeşte *putere de absorbţie-A_T* iar cea care exprimă fracţiunea reflectată se numeşte *putere de reflexie- R.*

Corpul "*absolut negru*" sau "*receptorul integral*" (inexistent în natură), absoarbe toate radiaţiile indiferent de lungimea de undă, deci $A = 1$ şi $R = 0$.

1.2.1 Legea lui Kirchhoff

Kirchhoff a arătat că, la echilibru termodinamic, intensitatea **I** a radiaţiei nu depinde nici de punctul M, nici de direcţia $\vec{u}$, nici de forma geometrică a cavităţii. ***I** depinde numai de temperatură.*

Dacă dI este intensitatea energetică pentru un interval spactral fixat, atunci mărimea:

$$I_\nu = \frac{dI}{d\nu}$$

se numeşte intensitate spectrală, corespunzătoare frecvenţei ν şi nu depinde decât de frecvenţă şi de temperatură.

Conform legii lui Kirchhoff raportul dintre puterea de emisie $E_{\lambda T}$ şi puterea de absorbţie $A_{\lambda T}$ care corespunde unei anumite lungimi de undă şi unei temperaturi T, este o mărime constantă, aceeaşi pentru toate corpurile şi egală cu puterea de emisie a corpului absolut negru ($I_{\lambda T} = E_{\lambda T}$).

Legea lui Kirchhoff este:

$$I_{\lambda T} = \frac{E_{\lambda T}}{A_{\lambda T}} \tag{6}$$

Substanta nu poate emite decât radiaţiile pe care le poate absorbi.

1.2.2.Legea lui Planck

Distribuţia energiei radiante în spectrul de emisie a corpului absolut negru pentru diferite temperaturi, T, poate fi descrisă pe baza legii lui Planck:

$$E_{\lambda T} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp\left[\frac{C_2}{\lambda T} - 1\right]} \tag{7}$$

unde $E_{\lambda T}$ ($Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$) este energia emisă în unitatea de timp de unitatea de arie în intervalul $[\lambda, \lambda + d\lambda]$ iar C_1 şi C_2 sunt constante.

$C_1 = 2\pi hc^2$ iar $C_2 = hc/k$.

k este constanta lui Boltzmann cu valoarea: $1,38 \cdot 10^{-23} JK^{-1}$.

Din ecuaţia (7) se poate concluziona:

- Corpurile absorb radiaţiile cu λ pe care le pot emite la aceeaşi temperatură.
- Corpurile care absorb bine radiaţia emit bine şi invers
- Corpul real din natură, nefiind corp absolut negru ($k_\lambda < 1$), emite numai o anumită parte din radiaţia pe care o emite corpul negru absolut la aceeaşi temperatură..

Legea lui Planck descrie repartizarea energiei radiate de un corp negru încălzit pe diferitele lungimi de undă din spectrul emis. Când temperatura corpului negru variază, se schimbă şi energia transportată de fiecare radiaţie monocromatic.

1.2.3. Legea Ştefan-Boltzmann

Legea Ştefan-Boltzmann stabileşte că puterea emisiei integrale sau puterea radiantă totală (radianţa E) a corpului absolut negru este proporţională cu temperatura absolută a acestuia la puterea a patra:

$$E = \sigma T^4 \tag{8}$$

relaţie în care $\sigma = 5{,}70\ 10^{-8}\ W/m^2K^4$ poarta numele de constanta Boltzmann.

Aşa cum s-a mai spus, în natură nu există corpuri absolut negre. Corpurile reale absorb numai o parte din radiaţiile incidente şi se numesc *corpuri cenuşii*.

Radianţa $E(T)$ a corpului cenuşiu la temperatura T este mai mică decât cea a corpului negru la aceeaşi temperatură, astfel că legea Stefan-Boltzmann pentru corpurile cenuşii se scrie $E(T) = \varepsilon_T \sigma T^4$

Mărimea ε_T se numeşte *factor energetic de emisie* sau *coeficient de înnegrire*.

Pentru corpurile cenuşii (reale), coeficientul ε_T depinde atât de temperatură, cât şi de natura materialului.

1.2.4. Legea de deplasare Wien stabileşte relaţia dintre lungimea de undă corespunzătoare maximului energiei radiante a corpului absolut negru şi temperatura lui absolută aratând, că produsul dintre λ care corespunde puterii de emisie maximă (λ_{max}) a unui corp şi temperatura absolută a acestuia este o mărime constantă,

$$\lambda_{max} T = 2897{,}8\ \text{nm} \cdot \text{K} \tag{9}$$

Deci cu cât este mai ridicată temperatura corpului cu atât puterea de emisie maximă corespunde unei lungimi de undă mai mici şi invers. Schimbarea temperaturii absolute a unui corp atrage după şi schimbarea lungimii de undă a energiei maxime emise.

Această lege explică variaţia culorii (strălucirii) unui corp încălzit. Pe măsură ce temperatura creşte, maximul energiei radiate se deplasează spre lungimi de undă mici (spre ultraviolet), de aceea legea (9) se mai numeşte *legea de deplasare a lui Wien*, descoperită în 1893.

Legea lui Wien este o consecinţă a legii lui Planck, care are semnificaţia unei funcţii de distribuţie a energiei emise de un corp, după diferite lungimi de undă.

2. Teoria lucrării

In acord cu legea Stefan –Boltzmann energia emisă în unitatea de timp pe suprafata unitate (ec 8) este proportională (pentru corpul negru) cu temperatura la puterea a patra.Legea Stefan Boltzmann este valabilă şi pentru corpul cenuşiu pentru care coeficientul de absorbţie este mai mic decât unu. In experimentul prezentat in aceasta lucrare, corpul cenusiu este reprezentat de filamentul unui bec (lampă incandescentă) a cărei energie de emisie este investigată în funcţie de temperatură.

Pentru a verifica legea radiaţiei Stefan –Boltzmann se măsoară radiaţia emisă de filamentul becului. Pentru o anumita distanţă dintre filament şi un termocuplu, fluxul de energie radiantă indicat de termocuplu este proportional cu E(T). Pentru ca fluxul de energie este proporţional cu tensiunea electromotoare a termocuplului, $U_{temocuplu}$, se poate scrie: $U_{termocuplu} \sim T^4$ dacă termocuplul este la 0°C. Deoarece termocuplul este la temperatura camerei (T_{cam}) el radiază aşa ca se scrie:

$$U_{termocuplu} \sim (T^4 - T_{cam}^4) \qquad (9)$$

In general, se poate neglija temperatura camerei in raport cu temperatura T atunci când se reprezuinta energia termocuplului in scara logaritmică.:
$\log U_{termocuplu} = 4 \log T + const$.

Temperatura absolută a filamentului de tungsten este calculată din rezistenţa sa care este o funcţie de temperatura (t in grade Celsius):

$$R(t) = R_0(1 + \alpha t + \beta t^2) \qquad (10)$$

cu R_0 rezistenţa la 0°C.

$\alpha = 4{,}82 \cdot 10^{-3} K^{-1}$ şi $\beta = 6{,}76 \cdot 10^{-7} K^{-2}$

Rezistenţa R_0 poate fi gasită prin folosirea relaţiei:

$$R_0 = \frac{R(t_R)}{1 + \alpha t_R + \beta t_R^2}$$

temperatura T se obtine rezolvând ecuatia în raport cu t :

$$T = 273 + \frac{1}{2\beta}\left[\sqrt{\alpha^2 + 4\beta\left(\frac{R(t)}{R_0} - 1\right)} - \alpha\right] \qquad (11)$$

Rezistenţele la temperaturile t şi t_R se găsesc folosind legea lui Ohm, măsurând tensiunea la filament.

3. Modul de lucru

Scopul lucrării este de a verifica legea radiaţiei Stefan-Boltzman.

Pentru aceasta, lucrarea presupune:

3.1 Masurarea rezistenţei filamentului lămpii cu incandescenţă la temperatura camerei. Rezistenţei filamentului la zero grade Celsius, se cunoaste: $R_0 = 0{,}15\,\Omega$.

3.2.Măsurarea densităţii fluxului energetic al lămpii la diferite valori ale tensiunii pe timpul încălzirii. Din expresia rezistenţei filamentului în functie de temperatură se calculeaza temperatura (ec. 11).

- Se realizează montajul din Fig 1. In timpul experimentului nu se modifica pozitia lampii.
- Se aplica pe filament o tensiune pana la valoarea maxima de 5V **(atentie! Nu se va depasi aceasta valoare);**
- Se vor face 20 determinari in intervalul 2- 5V.
- Se va citi tensiunea si intensitatea si se calculeaza valoarea rezistentei filamentului de tungsten: $R_{filament} = \frac{U}{I}$; se obtin 20 de valori ale rezistentei R(t)
- Se calculeaza temperatura absoluta a filamentului de tungsten (ec 11)

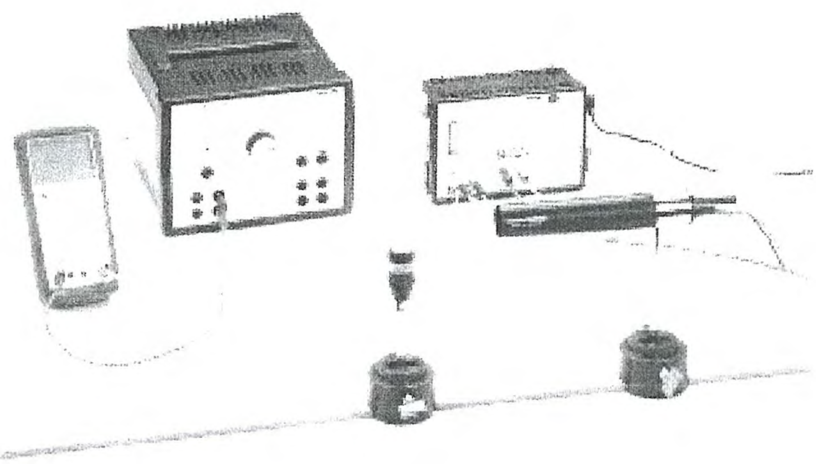


Fig.1. Instalatia experimentala

- Pentru ca fluxul de energie este proporțional cu tensiunea electromotoare a termocuplului, $U_{temocuplu}$, se determina aceasta tensiune dintr-un sir de 50 de masuratori care se vizualizeaza pe ecranul calculatorului.
- Pe ecranul calculatorului se poate citi valoarea medie a tensiunii la senzor $U_{termocuplu}$, pentru fiecare cuplu (U, I) din determinarea rezistentei filamentului.

- Se va reprezenta grafic $U_{termocuplu} = f(T^4)$.