

**UNIVERSITATEA "POLITEHNICĂ" DIN BUCUREȘTI  
DEPARTAMENTUL DE FIZICĂ**

**LABORATORUL BN 120**

**DETERMINAREA CONSTANTEI  
STEFAN-BOLTZMANN**

# DETERMINAREA CONSTANTEI STEFAN-BOLTZMANN

## 1. Considerațiuni teoretice; Scopul lucrării

Radiația termică este emisă de orice corp a cărui temperatură este diferită de zero absolut. Aceasta este radiație electromagnetică, iar spectrul ei este continuu, cu un maxim care depinde puternic de temperatura corpului.

Originea fenomenului se află în mișcarea de agitație termică a particulelor microscopice. Cum se cunoaște din electromagnetism, orice particulă purtătoare de sarcină

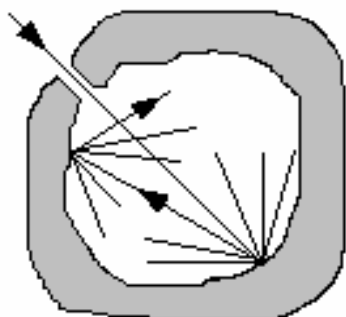


Fig.1. Cavitare corp negru

electrică (ioni și electroni) în mișcare accelerată emite radiație electromagnetică. Evident, mișcarea dezordonată de agitație termică este neuniformă, indiferent dacă aceasta este mișcare de translație, ca într-un gaz, sau de vibrație, ca într-un solid. Astfel, în interiorul oricărui corp există un câmp de radiație electromagnetică complex. O parte din energia acestuia este reabsorbită de particule, iar partea care părăsește corpul constituie radiația termică a acestuia.

Prin radiație, corpul pierde energie deci, dacă nu primește o cantitate echivalentă de energie din exterior, temperatura sa se va reduce și implicit și emisia de radiație. Dacă energia pierdută este exact compensată de un aport de energie din exterior, atunci temperatura corpului rămâne constantă iar radiația emisă se numește radiație de echilibru.

Există și fenomenul invers adică, dacă asupra unui corp este incidentă o radiație acesta va absorbi o parte din radiație, restul fiind reflectată. Dacă corpul absoarbe întreaga radiație incidentă, indiferent de frecvența (lungimea de undă) a acesteia, corpul se numește corp (absolut) negru. Un corp negru se realizează de exemplu cu ajutorul unei cavități prevăzută cu o deschidere a cărei arie este extrem de mică în raport cu aria întregii cavități. Așa cum sugerează Fig.1, o radiație care intră în cavitare, va suferi numeroase reflexii difuze pe pereții cavității și, întrucât la contactul cu peretele o parte din radiație este absorbită, în final, absorbția va fi totală.

În cele ce urmează, folosim următoarele notații:  $\nu$  - frecvența,  $\lambda = c / \nu$  - lungimea de undă unde  $c$  este viteza luminii în mediul considerat, frecvența unghiulară  $\omega = 2\pi\nu$ .

Este uzual a caracteriza proprietățile de absorbție prin absorbtivitatea spectrală definită ca raport dintre energia absorbită și energia incidentă pentru fiecare frecvență  $\nu$  (lungime de undă  $\lambda$ ):

$$a_{\nu} = \left( \frac{W_{abs}}{W} \right)_{\nu} \quad (1)$$

unde  $W_{abs}$  și  $W$  reprezintă fluxul de energie absorbit, respectiv incident. Prin flux incident se înțelege energia radiației incidente pe suprafața corpului în unitatea de timp. Un corp negru este caracterizat de proprietatea  $a_{\nu} = 1$ , care arată că absorbția este totală (100%) la orice frecvență (lungime de undă). Multe corpuri, printre care și filamentul unui bec electric, sunt caracterizate de absorbție independentă de frecvență dar subunitară, motiv pentru care un asemenea corp este numit *corp gri*. Referitor la calitățile de emisie ale unui corp se definește emisivitatea (presupusă independentă de  $\lambda$ ) prin relația  $E =$  Energia radiantă a corpului/Energia radiantă a unui corp negru cu aceeași temperatură. Prin energie radiantă (radianță) se înțelege energia emisă de unitatea de suprafață a corpului în unitatea de timp și unitatea de unghi solid (steradian, prescurtat SR). Pentru un corp gri,  $0 < E < 1$ .

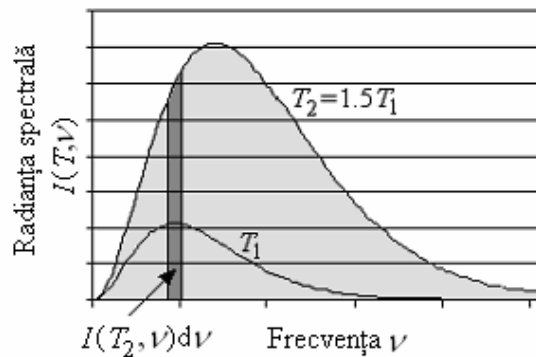


Fig.2. Spectrul radiației termice de echilibru ca funcție de temperatura corpului negru

Spectrul radiației termice este continuu. Calitativ, curba dependenței de frecvență a radianței spectrale (densității spectrale de flux de energie)  $I(T, \nu)$  emisă de un corp negru aflat la o temperatură absolută  $T$ , arată ca în Fig.2, unde se consideră spectrul pentru două temperaturi absolute în raportul  $T_2 / T_1 = 1,5$ . Această dependență este foarte bine redată de formula lui Planck

$$I(T, \nu)d\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} d\nu \quad (\text{W/m}^2 \cdot \text{SR}) \quad (2)$$

unde  $k$  este constanta lui Boltzmann. Cantitatea descrisă de ecuația 2 este redată prin domeniul umbrit mai intens pe Fig.2. În funcție de lungimea de undă, intensitatea spectrală se exprimă prin

$$I(T, \lambda) d\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} d\lambda \quad (\text{W/m}^2 \cdot \text{SR}). \quad (3)$$

Foarte adesea, ceea ce este important din punct de vedere practic, este intensitatea totală emisă, indiferent de frecvență (lungimea de undă). Aceasta se obține printr-o integrare a expresiei (2) sau (3), adică

$$I(T) = \int_0^{\infty} I(T, \nu) d\nu = \int_0^{\infty} \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} d\nu. \quad (4)$$

Pentru efectuarea integralei, utilizăm noua variabilă  $z = \frac{h\nu}{kT}$ . Integrala devine

$$I(T) = \frac{2h}{c^2} \left( \frac{kT}{h} \right)^4 \int_0^{\infty} \frac{z^3}{e^z - 1} dz = AT^4 \quad (5)$$

unde

$$A = \frac{2h}{c^2} \left( \frac{k}{h} \right)^4 \int_0^{\infty} \frac{z^3}{e^z - 1} dz \quad (6)$$

este o constantă. Relația (5) reprezintă **legea Stefan – Boltzmann** numită astfel în onoarea celor doi fizicieni care au formulat-o prima dată.  $A$  poartă numele de constanta lui Boltzmann.

Cu alte cuvinte, această lege afirmă că aria delimitată de curba intensității spectrale  $I(T, \nu)$  și axa frecvenței (umbrită mai puțin pe Fig.2) crește direct proporțional cu puterea a patra a temperaturii absolute.

Raționamentul prezentat se referă la un corp negru. Pentru un corp gri, legea Stefan – Boltzmann are aceeași formă, dar constanta are o valoare mai mică decât cea dată de ecuația (6) și depinde de corpul considerat (cât de gri este acesta!).

Lucrarea are ca scop verificarea dependenței intensității totale emise de un corp gri (filamentul unui bec electric), de temperatura absolută a acestuia.

## 2. Sistemul experimental și modul de lucru

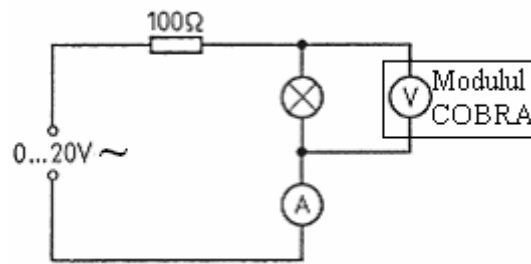


Fig.3. Schema pentru determinarea lui  $R_0$



Fig.4. Sistemul de conexiuni pentru trasarea curbei  $I(T)$

Prima operațiune constă în determinarea rezistenței filamentului becului la temperatura ambiantă (considerată o bună aproximație pentru rezistența la  $0^{\circ}\text{C}$ , notată  $R_0$ ). Se utilizează montajul din Fig.3. Legarea rezistenței de  $100\Omega$  în serie cu filamentul becului se realizează cu ajutorul unei cutii cu contacte prezentă pe masa de lucru (rezistența de  $100\Omega$  este deja montată). Intensitatea curentului,  $I$  se măsoară cu multimetrul digital (setat pentru a măsura curent alternativ), iar tensiunea la bornele filamentului, cu sistemul Cobra prin conectarea celor doi conductori la bornele notate "Analog In 2 / S2". Alimentarea circuitului se face în curent alternativ de la generatorul de pe masă. Tensiunea de alimentare se reglează astfel încât, intensitatea curentului să fie de  $100\text{mA}$ . Pentru măsurarea tensiunii se deschide calculatorul care intră direct în programul de măsurare. Se apelează "measure" și se selectează "Gauge" > "Universal Writer" și se verifică setările prezentate în Fig.3 din instrucțiunile proprii (fișierul PDF). Tensiunile se prezintă sub formă sinusoidală iar în calculul rezistenței trebuie considerate valorile efective. Acestea se calculează astfel: cei doi markeri (apelare în dreapta sus) se aduc tangent la maximele, respectiv minimele graficului tensiunii. Pe ecran se afișează diferența dintre valorile maximă și minimă  $\Delta y$ . Valoarea efectivă a tensiunii se obține împărțind  $\Delta y$  la

$2\sqrt{2} \approx 2,82$  (vezi Fig.4 din instrucțiunile proprii, fișierul PDF). Rezistența se calculează cu relația

$$R_0 = \frac{\Delta y}{2\sqrt{2}I} \quad (7)$$

Se notează valoarea obținută.

Se repetă operația de 3 ori. Se reduce intensitatea la 50mA și se fac din nou 3 măsurători. Media tuturor valorilor obținute se va considera ca valoare a lui  $R_0$  pentru calculul lui  $R(t)$  și apoi a temperaturii la fiecare intensitate din seria de măsurători pentru trasarea curbei  $I(T)$ . Se utilizează relația care descrie dependența rezistenței de temperatură

$$R(t) = R_0(1 + \alpha t + \beta t^2) \quad (8)$$

unde  $\alpha = 4,82 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ ,  $\beta = 6,67 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-2}$  sunt constantele de material pentru filament (tungsten). Rezolvând (8) ca pe o ecuație de gradul 2, se obține temperatura absolută a filamentului la fiecare intensitate utilizată în seria de măsurători pentru trasarea curbei  $I(T)$ , sub forma

$$T = 273 + \frac{1}{2\beta} \left[ \sqrt{\alpha^2 + 4\beta \left( \frac{R(t)}{R_0} - 1 \right)} - \alpha \right]. \quad (9)$$

Pentru efectuarea măsurătorilor de intensitate luminoasă se fac conexiunile din Fig.4, adică intensitatea curentului prin filament este măsurată de multimetru iar tensiunea pe filament este măsurată de canalul "Analog In 1 / S1", în timp ce, intensitatea luminoasă este măsurată prin tensiunea generată de termopilă, înregistrată de canalul "Analog In 2 / S2". Distanța dintre bec și termopilă trebuie să fie de maximum 20cm (2-3cm față de limita tubului de ecranare).

Se consideră valori ale intensității curentului între 2A și 5,5A în trepte de 0,5A. (Se măsoară în prealabil răspunsul de întuneric al termopilei (cu becul stins) și se face corecția corespunzătoare pentru fiecare valoare.)

Tensiunile sunt sinusoidale iar în calculul rezistenței trebuie considerate valorile efective calculate la fel ca mai sus:  $U_1 = \frac{\Delta y}{2\sqrt{2}}$ . Pentru obținerea componentei continue  $U_2$

a tensiunii generate de termopilă (care are un aspect de sinusoidă foarte zgomotoasă) se apelează „Analysis> Show average value”. Rezultatul acestei măsurători se obține în volți. În tabelul de valori care se construiește,  $U_2$  va fi introdus în milivolți. Cu cele trei valori de interes,  $U_1, I, U_2$ , se realizează un tabel. Introducerea acestor date în programul de prelucrare se face apelând “Measurement>Enter data manually”. Se selectează opțiunea „3 Channels”, se indică numărul de valori pentru fiecare din cei trei parametri (de exemplu „8”, în dreapta sus) și numărul de cifre semnificative ale fiecărui parametru (2-3 digits). Se dă comanda „OK”; apare un grafic cu curbe ale celor trei parametri ca funcție de numărul curent, în culori diferite.

Pentru calcule se apelează “Analysis>Channel modification”. Apare fereastra arătată în Fig. 5 din instrucțiunile proprii (fișierul PDF), care servește pentru calcularea rezistenței. Pentru aceasta, în câmpul din dreptul simbolului  $f :=$  se scrie ecuația  $U_1 / I$ . Comada finală este “Calcualte”. Apare o nouă curbă, curba rezistenței. Se procedează analog pentru calcularea temperaturii (vezi Fig. 5 din instrucțiunile proprii (fișierul PDF)). În câmpul din dreptul simbolului  $f :=$  se scrie ecuația (9) sub forma

$$273 + 7396.45 * ((0.2323 + 0.02704 * (R / R_0 - 1))^{0.5} - 0.482)$$

în care  $R_0$  se introduce ca valoare numerică – cea obținută în prima fază a măsurărilor. Apare o nouă curbă, curba temperaturii absolute. Prin același procedeu, se calculează logaritmul tensiunii date de termopila,  $f := \ln(U_2)$  și logaritmul temperaturii  $f := \ln(T)$ . În acest mod, se generează alte două curbe care vor fi folosite în calculul graficului  $\ln(U_2) = f(\ln(T))$ . Pentru aceasta se peleză „Measurement>Channel manager”. Apare o fereastră și se selectează  $\ln(T)$  ca axă  $x$  (în zona „Destination”) și  $\ln(U_2)$  ca axă  $y$  (în zona „Destination”). La comanda „OK” apare graficul  $\ln(U_2) = f(\ln(T))$ . Pentru aflarea pantei se face click pe iconița corespunzătoare (în stânga ecranului). Apare scrisă pe ecran valoarea pantei. Aceasta este mărimea căutată.

Se întocmește un referat asupra lucrării în conformitate cu instrucțiunile date de conducătorul activității de laborator.

### **Recomandări și precauții**

1. Termopila trebuie astfel orientată încât să se evite lumina parazită (de exemplu, nu spre fereastră) și să fie cât mai bine aliniată cu sursa de lumină (filamentul becului).
2. Înainte de a conecta dispozitivul la priză, se verifică poziția butonului pentru reglajul tensiunii de alimentare al generatorului – acesta trebuie să fie rotit complet spre stânga (să indice diviziunea zero).
3. Când se aplică tensiunile de alimentare pentru obținerea diferitelor intensități de curent prin filament, rotirea spre dreapta a butonului de reglaj se face foarte lent (altfel, există riscul arderii becului)