

7. ŠILUMINIS SPINDULIAVIMAS

Žinoma, kad visi kūnai, kurių temperatūra didesnė už nulį, skleidžia elektromagnetines bangas, t. y. praranda energiją. Jų vidinė energija (kartu ir temperatūra) turi mažėti. Jei temperatūra nekinta, reiškia energija nuolat papildoma. *Šiluminis spinduliavimas* yra kūno elektromagnetinis spinduliavimas, kurį sukelia kūno sužadinti atomai arba molekulės dėl jų šiluminio judėjimo. Didėjant kūno temperatūrai spinduliuotės tankis didėja.

Kūnas ne tik spinduliuoja, bet ir sugeria šiluminę spinduliuotę. Šiluminis spinduliavimas stacionarus, jei spinduliuojančiojo kūno temperatūra pastovi dėl pastovaus jo kaitinimo. Stacionarusis šiluminis spinduliavimas, vykstantis termiškai izoliuotų kūnų sistemoje, kurioje kūnai gali keistis energija tik per elektromagnetinę spinduliuotę ir sugertį, vadinamas *pusiausviruoju šiluminiu spinduliavimu*.

Tarkime, kad erdmė, kurią supa elektromagnetinę spinduliuotę idealiai atspindintis sluoksnis, yra kūnas. Jo skleidžiama spinduliuotė neišsisklaido erdvėje, bet atsispindėjusi nuo sienelių lieka erdmėje, vėl krinta į kūną ir iš dalies sugeriama. Tokiomis sąlygomis energijos nuostolių nėra. Kai šiluminis spinduliavimas yra pusiausviras, elektromagnetinių bangų, skleidžiamų kiekvieno sistemos kūno per vienetinį laiką, energija lygi energijai bangų, sugeriamų šių kūnų per tą patį laiką.

Į erdmę įdėkime įkaitintą kūną. Jei per vienetinę trukmę kūnas išspinduliuoja daugiau energijos negu sugeria, jo temperatūra krinta. Šiuo atveju spinduliuotė silpnėja iki to momento, kol susidaro pusiausvyra. Tokia pusiausvyra būseną stabili.

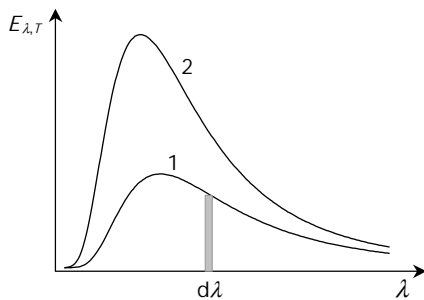
7.1. PAGRINDINIAI ŠILUMINIO SPINDULIAVIMO DĖSNIAI

Pagrindinis šiluminę spinduliuotę nusakantis dydis yra kūno *temperatūra*. Tarkime, kad keli kūnai, įkaitinti iki skirtingos temperatūros, yra erdmėje, kurią supa šilumos nepraleidžiantis apvalkalas su idealiai šilumą atspindinčiomis sienelėmis, o viduje yra vakuumas, todėl nesikeičiama šiluma laidumo ir konvekcijos būdu. Kūnai keičiasi energija spinduliuotės būdu. Kiekvieno kūno spinduliuotė priklauso nuo jo temperatūros. Be to, šiltesnieji kūnai vėsta, nes išspinduliuoja didesnę energijos kiekį, negu gauna iš aplinkinių kūnų, o šaltesnieji kūnai įkaista, nes gauna daugiau energijos, negu atiduoda. Erdmėje visą laiką spinduliuojama energija. Bandymai rodo, kad galiausiai nusistovi stacionarioji būsena (šiluminė pusiausvyra), kurioje visi kūnai įgyja vienodą temperatūrą. Tokios būsenos kūnai per vienetinį laiką sugeria tiek energijos, kiek atiduoda, ir spinduliuotės energijos tankis erdvėje įgyja tam tikrą vertę, atitinkančią turimąją temperatūrą. Iš to išplaukia, kad jei dviejų kūnų sugerties geba skirtinga, jų spinduliavimo geba negali būti vienoda. Jei du kūnai sugeria skirtingą energijos kiekį, tai jų spinduliuotės energija taip pat skirtinga.

Kūno *spinduliavimo geba* E yra energijos srautas, kurį skleidžia kūno vienetinis paviršius visomis kryptimis: $E = d\Phi/dS$.

Jei į vienetinį paviršių krinta šviesos srautas $d\Phi$, tai jo dalį $d\Phi'$ kūnas sugeria. Santykis $A = d\Phi'/d\Phi$ vadinamas kūno *sugerties geba*.

Per bandymus pastebėta, kad spinduliavimo geba priklauso ne tik nuo dažnio (arba bangos ilgio), bet ir nuo spinduliuojančio kūno temperatūros T :



7.1 pav. Spinduliavimo gebos spektrinis skirstinys skirtingose temperatūrose

Spektrinis šiluminio spinduliavimo gebos skirstinys pavaizduotas 7.1 pav. Brūkšniuotoji juostelė atitinka $d\lambda$ ilgio ruožo bangų energiją dE_T . Visuminę spinduliavimo gebą nusako kreivės ribojamas plotas. Didėjant temperatūrai kūno spinduliuojama energija didėja (2 kreivė); didėja skirstinio kreivės ribojamas plotas, t. y. didėja visuminė kūno spinduliavimo geba.

Kūno sugerties geba taip pat priklauso nuo dažnio (arba bangos ilgio) ir temperatūros. Kūnas, kuris visiškai sugeria į jį krintančią visų dažnių spinduliuotę, vadinamas *juodoju kūnu*; jo sugerties geba $A_{v,T} = 1$.

Sąryšį tarp kūno spinduliavimo gebos ir sugerties gebos nusako **Kirchhofo (Kirchhoff) dėsnis**: *spinduliavimo ir sugerties gebos dalmuo nepriklauso nuo kūno prigimties*. Santykis $E_{v,T}/A_{v,T}$ vienodas visiems kūnams ir yra universalioji dažnio ir temperatūros funkcija, nors įvairių kūnų $E_{v,T}$ ir $A_{v,T}$ gali gerokai skirtis.

Juodajam kūnui (jo sugerties geba lygi vienetui) santykis

$$\frac{E_{v,T}}{A_{v,T}} = \varepsilon_{v,T};$$

čia $\varepsilon_{v,T}$ – juodojo kūno spinduliavimo geba. Universalioji Kirchhofo funkcija yra juodojo kūno spinduliavimo geba.

Kūnai, kurių sugerties geba mažesnė už vienetą, vadinami *pilkaisiais*. Jų spinduliavimo geba mažesnė už juodojo kūno spinduliavimo gebą.

Kirchhofo dėsnis išskėlė šiluminio spinduliavimo teorijai svarbią užduotį – nustatyti funkcijos $\varepsilon_{\lambda,T}$ analizinę išraišką. Ilgą laiką daugelis mėginimų neišsprendė bendrosios užduoties. Teorinė Kirchhofo funkcijos išraiška buvo rasta tik panaudojus kvantinės teorijos įvaizdžius.

Tiriant šiluminį spinduliavimą buvo suformuluotas **Stefano ir Bolcmano dėsnis**, kuris teigia, kad *juodojo kūno visuminė (visų ilgių bangų) spinduliavimo geba proporcinga temperatūrai ketvirtuoju laipsniu*:

$$\varepsilon_T = \int_0^{\infty} \varepsilon_{v,T} dv = \sigma T^4;$$

čia σ – Stefano ir Bolcmano konstanta, kuri lygi $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$.

Galima gauti bangos ilgio λ_{\max} , kurį atitinka didžiausia funkcijos $\varepsilon_{\lambda,T}$ vertė, ir temperatūros T sąryšį:

$$T \lambda_{\max} = b; \quad (7.1.1)$$

čia b – Vyno konstanta, nepriklausanti nuo temperatūros ($b = 0,29 \text{ cm}\cdot\text{K}$).

(7.1.1) išraiška vadinama **Vyno poslinkio dėsnium**, kuris teigia, kad *didėjant temperatūrai juodojo kūno spinduliavimo gebos maksimumas slenka į trumpesniųjų bangų sritį*.

Dž.Reilis (*J.Rayleigh*) ir Dž.Džinsas (*J.Jeans*), pasinaudoję klasikinės statistikos teorema apie energijos tolygų pasiskirstymą pagal laisvės laipsnius, pateikė tokią išraišką:

$$\varepsilon_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT \quad \text{arba} \quad \varepsilon_{\lambda,T} = \frac{2\pi c}{\lambda^4} kT.$$

Tai **Reilio ir Džinsso formulės**.

Šios išraiškos patenkinamai atitinka eksperimentinius duomenis tik ilgųjų bangų srityje ir gerokai skiriasi mažųjų bangų srityje. Atsiranda prieštaros. Pvz., integruojant λ atžvilgiu

$$\varepsilon_T = \int_0^{\infty} \varepsilon_{\lambda,T} d\lambda = 2\pi c k T \int_0^{\infty} \frac{d\lambda}{\lambda^4} = \infty,$$

t. y. juodojo kūno visuminė spinduliavimo geba turi būti be galo didelė. Tai reiškia, kad pusiausvyra tarp materialiuųjų kūnų ir spinduliuotės gali susidaryti tik esant begaliniam spinduliuotės tankiui. Tačiau per bandymus paaiškėjo, kad pusiausvyra tarp spinduliuotės ir kūno susidaro bet kurioje temperatūroje ir tos spinduliuotės energijos tankis, palyginti su kūno energijos tankiu, yra mažas.

Reilio ir Džinsso formulė, išreikšta remiantis klasikine fizika, prieštarauja faktui – didesnė šiluminės spinduliuotės energijos dalis sutelkta trumpesniųjų bangų spektro srityje. Tokia išvada pavadinta *ultravioletine katastrofa*.

Reilio ir Džinsso formulė kokybiškai tinka tik ilgesniųjų bangų srityje. 1896 m. Vynas pateikė tokią formulę:

$$\varepsilon_{\lambda,T} = \frac{A}{\lambda^5} \exp\left(-\frac{B}{\lambda T}\right);$$

(čia A ir B – konstantos), kuri iš dalies tinka trumpesnėms bangoms, bet netinka ilgesnėms.

Taigi XIX a. pabaigoje buvo pateiktos dvi formulės, kurios kokybiškai atitiko eksperimentų rezultatus ribotose spektro srityse, bet nė viena nenusakė visos eksperimentinės kreivės. Tapo aišku, kad klasikinė fizika nesusidoroja su šiluminio spinduliavimo dėsniniais ir reikia iš esmės peržiūrėti pagrindinius teiginius.

7.2. PLANKO FORMULĖ

Klasikinė elektrodinamika galėjo sėkmingai paaiškinti tik tuos optinius reiškinius, kuriems elementarieji šviesos sąveikos su medžiaga procesai neturi esminio poveikio. Nagrinėjant šiluminį spinduliavimą šie procesai svarbūs. Todėl šiluminio spinduliavimo problemų klasikinė elektrodinamika nepajėgė išspręsti.

Klasikinės fizikos pagrindus peržiūrėjo M. Plankas (*Planck*) 1900 m. Jis iškėlė mintį, kuri iš esmės prieštaravo klasikinės statistinės fizikos ir elektrodinamikos įvaizdžių sistemai. Jo hipotezė teigia, kad *elektromagnetinė spinduliuotė spinduliuojama ne tolygiai, o atskiro- mis porcijomis (kvantais)*, kurių energijos dydis proporcingas dažniui:

$$\varepsilon = h\nu = h \frac{c}{\lambda};$$

čia $h = 6,622 \cdot 10^{-34}$ J·s – universalioji konstanta, vėliau pavadinta Planko konstanta.

Planko hipotezė prieštarauja klasikinės fizikos dėsniams, nes iš jų išplaukia, kad visi dydžiai (energija, judėjimo kiekis) gali laisvai įgyti bet kurias kiek norima mažas vertes ir gali kisti tolygiai. Pagal klasikinius dėsnius ν dažnio osciliatorius gali būti įvairios energijos, proporcingos amplitudei kvadratu. Tai reiškia, kad osciliatorius per vienetinį laiką gali spinduliuoti bet kurį energijos kiekį. Teoriškai modeliuojant juodąjį kūną, kaip begalinę harmoninių osciliatorių visumą, kurių kiekvienas skleidžia atskirą monochromatinę bangą, o visi kartu – ištiesinio spektro spinduliuotę (juodojo kūno spinduliuotę), ir naudojantis dėsniais, valdančiais šių osciliatorių veikimą, galima nustatyti tokios sistemos (juodojo kūno) spinduliavimo dėsni.

Tačiau toks būdas nedavė norimų rezultatų. Tik M. Planko teiginys, kad *harmoninis ν dažnio osciliatorius gali turėti tokį energijos kiekį, kuris yra elementariojo dydžio $h\nu$ kartotinis ($E_n = nh\nu$)*, pateikė teisingą rezultatą. Reikia nagrinėti ne medžiagos osciliatorius – spindulius, o spinduliuotės osciliatorius, atitinkančius elektromagnetines bangas; atliekamas vadinamasis „skleidimas osciliatoriais“.

Remiantis naujaisiais kvantiniais įvaizdžiais ir statistiniais metodais, M. Plankas pateikė spinduliavimo gebos išraišką, atitinkančią eksperimentų rezultatus:

$$\varepsilon_{\nu,T} = \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp(h\nu/kT)-1}; \text{ arba } \varepsilon_{\lambda,T} = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(hc/\lambda kT)-1}.$$

Tai *Planko formulė*.

Planko formulė gerai atitinka eksperimentinius rezultatus. Ji apibendrina du pagrindinius juodojo kūno spinduliavimo dėsnius – Stefano ir Bolcmano bei Vyno dėsnius.