Työ 15B, Lämpösäteily

Kurssi: Tfy-3.154, Fysiikan laboratoriotyöt
Ryhmä: 18
Pari: 1

Jonas Alam
Antti Tenhiälä

Selostuksen laati: Jonas Alam

Mittaukset tehty: 24.3.2000
Selostus jätetty: 4.4.2000

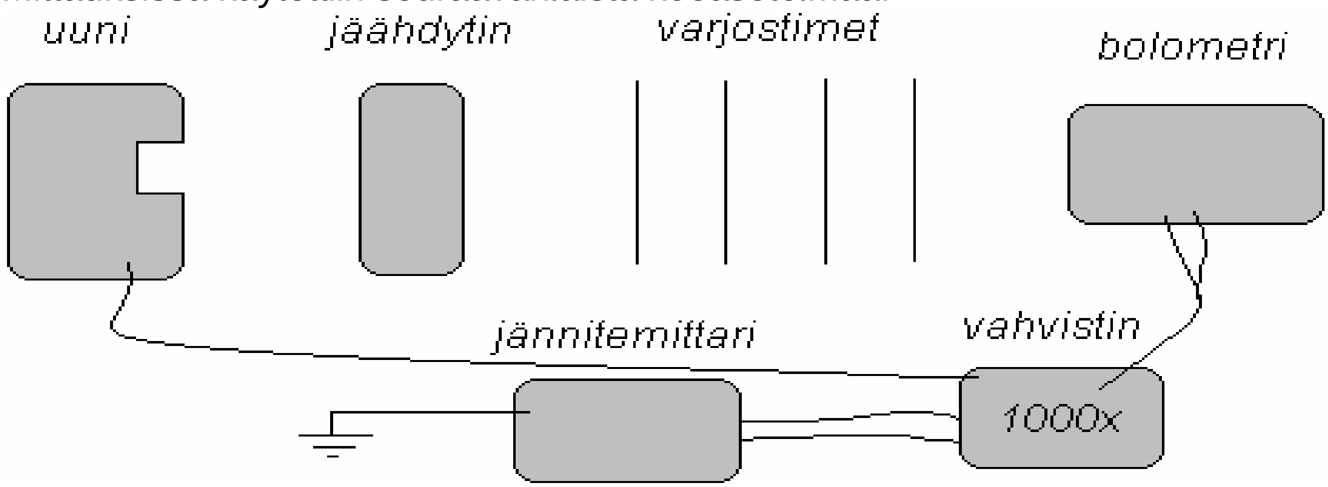
1. Johdanto

Lämpösäteily eli infrapunasäteily (IP-säteily) on sähkömagneettista säteilyä, joka aiheutuu atomien ja molekyylien lämpövärähtelystä. Mitä korkeampi lämpötila kappaleella on, sitä enemmän se emittoi IP-säteilyä ympäristöönsä. IP-säteilyn aallonpituus on noin 760 nm – 1 mm ja se läpäisee mm. lasin. Käyttötarkoituksia ovat esimerkiksi IP-kamerat ja television kaukosäätimet.

Työn tarkoituksena on mitata kokeellisesti ns. Stefan-Bolzmannin vakio, jonka merkitys nähdään myöhemmin.

2. Laitteisto ja menetelmät

Mittauksissa käytettiin seuraavanlaista koeasetelmaa:



Kuva 1. Koeasetelma.

Lämmitimme ensin uunin yli 300 celssiusasteeseen, jonka jälkeen annoimme sen jäähtyä lähes huoneen lämpötilaan asti. Uunista tuleva IP-säteily havaitaan bolometrin avulla jännitteenä jännitemittarissa. Jäähdytin poistaa ylimääräisen säteilyn. Jäähtymisen aikana mittasimme termoparin jännitteen arvoja, jotka oli vahvistettu 1000-kertaisiksi ja taulukosta pystyimme tämän tiedon avulla lukemaan uunin lämpötilan. Jännitteen tarkkuutta heikensi uunin lämpötilan jatkuva laskeminen, minkä takia arvot oli hankala saada vastaamaan oikeaa termoparin jännitteen arvoa. Uunin säteilystä aiheutunut jännite saadaan vähentämällä bolometrin jännitteestä ympäristön aiheuttama jännite, jonka saimme pitämällä yhtä varjostimista umpinaisena.

Kokeessa oletamme uunin approksimoivan riittävän tarkasti mustaa kappaletta. Mustaksi kappaleeksi sanotaan sellaista kappaletta, joka absorboi kaiken siihen osuvan säteilyn. Mustalle kappaleelle noudattaa pinnan lähettämä säteilyenergia puoliavaruuteen (M) Planckin säteilylakia:

$$\frac{dM}{dE} = S = \frac{2\pi}{h^3c^2}\frac{E^3}{e^{E/kT}-1} \tag{1}$$

Integroimalla kaavaa (1) yli koko energia-alueen, saadaan kokonaisemission riippuvuus lämpötilasta, eli Stefan-Boltzmannin laki, missä σ on Stefan-Boltzmannin vakio:

$$M = \sigma T^4 \tag{2}$$

Kun otetaan huomioon ympäristön ja mustan kappaleen lämpötilat, on säteilyn nettoenegia:

$$M = \sigma(T_1^4 - T^4{}_2) \tag{3}$$

ja todellisille kappaleille:

$$M = \varepsilon\sigma(T_1^4 - T_2^4) \tag{4}$$

missä ε on kappaleen pinnasta riippuva laaduton vakio, T1 kappaleen lämpötila ja T2 ympäristön lämpötila.

Saadut mittaustulokset taulukoidaan, ja sijoitetaan (T^4,U)-koordinaatistoon, jolloin saadaan suora:

$$U = sM = s\sigma\varepsilon(T^4 - T_0^4) \tag{5}$$

Vakio s, voidaan laskea seuraavien kaavojen avulla:
Bolometriin osuva teho:

$$P_b = \frac{A_e A_b}{\pi r^2} M \tag{6}$$

ja bolometrille pätee:

$$P_b = bU \tag{7}$$

missä Ae on emittoivan pinnan eli uunin aukon pinta-ala, Ab on bolometrin aukon pinta-ala, r uunin ja bolometrin välinen etäisyys ja b bolometrin herkkyys.

Kaavojen (5), (6) ja (7) avulla saadaan vakion s arvoksi:

$$s = \frac{A_e A_b}{\pi r^2 b} \tag{8}$$

3. Tulokset

Seuraavassa taulukossa mittaamamme havaintoarvot:

Uunin lämpötila (C)	T^4-(T0)^4 (K^4)	Termoparin jännite (mV)	Bolometrin jännite (mV), kun varjostin päällä	Bolometrin jännite (mV), ilman varjostinta
300	10,2346*10^10	12,21 ± 0,10	0,029 ± 0,002	1,12 ± 0,05
275	8,4714*10^10	11,18 ± 0,10	0,021 ± 0,002	0,88 ± 0,05
250	6,9337*10^10	10,16 ± 0,10	0,021 ± 0,002	0,72 ± 0,05
225	5,6013*10^10	9,14 ± 0,10	0,027 ± 0,002	0,56 ± 0,05
200	4,4551*10^10	8,13 ± 0,10	0,018 ± 0,002	0,44 ± 0,05
175	3,4769*10^10	7,13 ± 0,10	0,013 ± 0,002	0,34 ± 0,05
150	2,6494*10^10	6,13 ± 0,10	0,005 ± 0,002	0,23 ± 0,05
125	1,9563*10^10	5,12 ± 0,10	-0,002 ± 0,002	0,16 ± 0,05
100	1,3821*10^10	4,10 ± 0,10	-0,006 ± 0,002	0,12 ± 0,02
75	0,9125*10^10	3,05 ± 0,10	-0,007 ± 0,002	0,080 ± 0,01
50	0,5338*10^10	2,02 ± 0,10	-0,004 ± 0,002	0,046 ± 0,01
25	0,2335*10^10	1,00 ± 0,10	-0,009 ± 0,002	0,028 ± 0,005

Taulukko 1. Mittaustulokset.

Jännitteiden erotus U (ilman varjostinta - varjostin päällä)
1,09 ± 0,05
0,86 ± 0,05
0,70 ± 0,05
0,53 ± 0,05
0,42 ± 0,05
0,33 ± 0,05
0,23 ± 0,05
0,16 ± 0,05
0,13 ± 0,02
0,087 ± 0,012
0,050 ± 0,012
0,037 ± 0,007

Taulukko 2. Jännitteet.

Lasketaan ensin uunin aukon ja bolometrin aukon pinta-alat:
Ympyrälle pätee:

$$A = \pi r^2 \text{, missä r = d / 2.} \qquad (9)$$

Saadaan siis $A_e = \pi\left(\frac{d_{\hat{e}}}{2}\right)^2$ jossa de:n arvo on 37,1 mm, joten

$$A_e = \pi\left(\frac{0{,}0371m}{2}\right) = 10{,}81 \cdot 10^{-4}\, m^2 .$$

ja samoin bolometrin aukolle $A_b = \pi\left(\frac{0{,}0252m}{2}\right)^2 = 4{,}99 \cdot 10^{-4} m^2$.

Pinta-alojen virhe saadaan A:n osittaisdifferentiaalista:

$$\Delta A = \left|\frac{\pi d}{2}\Delta d\right| \qquad (10)$$

$$\Delta A_e = \left|\frac{\pi \cdot 0{,}0371m}{2} 0{,}0005m\right| = 0{,}29 \cdot 10^{-4}\, m^2 .$$

$$\Delta A_b = \left|\frac{\pi \cdot 0{,}0252m}{2} 0{,}0005m\right| = 0{,}20 \cdot 10^{-4}\, m^2 .$$

Ratkaisemalla σ, kaavoista (5) ja (8), saadaan Stefan-Boltzmannin vakion arvoksi

$$\sigma = \frac{\pi r^2 b}{A_e A_b \varepsilon} k \qquad (11)$$

Liitteeseen (1) on piirretty suora $U = s\sigma\varepsilon T^4 = \frac{A_e A_b}{\pi r^2 b}\sigma\varepsilon T^4$, jonka kulmakerroin

$$k = \frac{\Delta U}{\Delta T^4} = \frac{(1{,}156 - 0)\cdot 10^{-3} V}{(11{,}00 - 0{,}08)\cdot 10^{10} K^4} \pm \Delta k \approx 1{,}06 \cdot 10^{-14}\, \frac{V}{K^4} \pm 0{,}03 \cdot 10^{-14}\, \frac{V}{K^4} .$$

Kuvaajan lukemisessa ja piirtämisessä jätettiin uunin 25 C-astetta vastaava mittaustulos huomiotta, koska sitä ei saatu mittauksessa yhtä luotettavasti kuin muita arvoja, ja se näytti myös poikkeavan muista havaintoarvoista.
Mittauspöytäkirjassa todetaan r:n arvoksi r = (0,3890 ± 0,0005) m ja b:n arvoksi 5,9 W/V. Approksimoidaan uunin aukkoa mustaksi kappaleeksi, joten voimme olettaa että ε=1. Kootaan lukuarvot ja sijoitetaan kaavaan (11):

$$\sigma = \frac{\pi \cdot (0{,}3590m)^2 \cdot 5{,}9\frac{W}{V}}{10{,}81 \cdot 10^{-4}\, m^2 \cdot 4{,}99 \cdot 10^{-4}\, m^2 \cdot 1} 1{,}06 \cdot 10^{-14}\, \frac{V}{K^4} = 4{,}694295314 \cdot 10^{-8}\, \frac{W}{m^2 K^4} .$$

Lasketaan σ:n virhe kaavan (11) osittaisdifferentiaalin avulla:

$$\Delta\sigma = \frac{\pi r^2 b}{A_e A_b} k \left(\frac{2\Delta r}{r} + \frac{\Delta A_e}{A_e} + \frac{\Delta A_b}{A} + \frac{\Delta k}{k} \right) \qquad (12)$$

Sijoittamalla saadaan:

$$\Delta\sigma = \frac{\pi \cdot (0{,}3590m)^2 \cdot 5{,}9\frac{W}{V}}{10{,}81 \cdot 10^{-4} m^2 \cdot 4{,}99 \cdot 10^{-4} m^2 \cdot 1} 1{,}06 \cdot 10^{-14} \frac{V}{K^4} \left(\frac{2 \cdot 0{,}0005m}{0{,}3890m} + \frac{0{,}29 \cdot 10^{-4} m^2}{10{,}81 \cdot 10^{-4} m^2} + \frac{0{,}20 \cdot 10^{-4} m^2}{4{,}99 \cdot 10^{-4} m^2} + \frac{0{,}03 \cdot 10^{-14} \frac{V}{K^4}}{1{,}06 \cdot 10^{-14} \frac{V}{K^4}} \right)$$

$$\Delta\sigma \approx 0{,}46 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}.$$

Laskujen perusteella Stefan-Boltzmannin vakion arvoksi saadaan siis $\sigma = (4{,}69 \pm 0{,}46) \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} \approx (4{,}7 \pm 0{,}5) \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$.

4. Yhteenveto

Kirjallisuudesta saadaan Stefan-Boltzmannin vakion oikeaksi arvoksi $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$. Kokeen perusteella saatu arvo poikkeaa parisenkymmentä prosenttia oikeasta arvosta, eikä se edes osu virherajojen sisään. Ero ei kuitenkaan ole niin merkittävä, että kokeessa olisi ollut jokin merkittävä menetelmävirhe, sillä suuruusluokka on oikea.

Arvioimme suuren eron johtuvan mittausarvoista, jotka tehtiin sellaisilla uunin lämpötilan arvoilla, jotka olivat lähellä huoneen lämpötilaa. Liitteen (1) regressiosuorasta tämä voidaan havaita. Jos neljä ensimmäistä pistettä olisivat sijoittuneet samalle linjalle muiden pisteiden kanssa, olisi kulmakertoimeksi saatu suurempi arvo ja Stefan-Boltzmannin vakion arvo olisi osunut lähemmäksi oikeaa.

Kirjallisuusviitteet:

Fysiikan Laboratoriotyöt, Jukka Vaari, Suomen fyysikkoseuran julkaisuja 4
MAOL-taulukot, matematiikka, fysiikka, kemia, Otava

Liitteet:

Liite 1. T^4,U –koordinaatisto.
Liite 2. Mittauspöytäkirja.