

# Hőmérsékleti Sugárzás Mérése

Györgyfalvai Fanni ( BK0GIJ), Schäffer Bálint ( RHB36D)

2023. 09. 14.

## Tartalomjegyzék

|  |   |
|--|---|
| 0. Elméleti Összefoglaló                       | 2 |
| 0.1. A hőmérsékleti sugárzás alapjai . . . . . | 2 |
| 0.2. Az abszolút fekete test . . . . .         | 3 |
| 0.3. Nem fekete testek sugárzása . . . . .     | 4 |
| 1. Előkészületek                               | 5 |
| 2. Magas Hőmérsékletű Sugárforrás              | 6 |
| 3. Intenzitás Távolságfüggése                  | 6 |
| 4. Alacsony Hőmérsékletű Sugárforrás           | 6 |
| 4.1. A mérési összeállítás . . . . .           | 7 |
| 4.2. A mérés menete . . . . .                  | 7 |
| 5. Abszorpció tényezők meghatározása           | 7 |

## 0. Elméleti Összefoglaló

### 0.1. A hőmérsékleti sugárzás alapjai

Tapasztalati tény, hogy a testek, bennük atomi szinten lejárló folyamatok révén folyamatosan *elektromágneses sugárzást* bocsátanak ki. Ezen elektromágneses sugárzás intenzitását elsősorban a test hőmérséklete határozza meg, csak úgy, mint a kibocsátott sugárzás spektrális eloszlását. Nem véletlen tehát, hogy ezt a jelenséget **hőmérsékleti sugárzásnak** nevezzük.

Egy test által hőmérsékleti sugárzással kibocsátott energiát az *emiszióképességgel* ( $\epsilon$ ) jellemezzük. Ez megadja, hogy az adott test  $T$  hőmérsékleten egy  $\lambda$  körüli  $\Delta\lambda$  hullámhossztartományban egy  $\Delta A$  nagyságú felületről  $\Delta t$  idő alatt mennyi ( $\Delta E$ ) energiát sugároz ki, azaz:

$$\epsilon(\lambda, T) = \frac{\Delta E}{\Delta A \Delta t \Delta \lambda}. \quad (1)$$

A teljes spektrumban kisugárzott (felületre és időre normált) energiát pedig ennek integrálásával kaphatjuk meg:

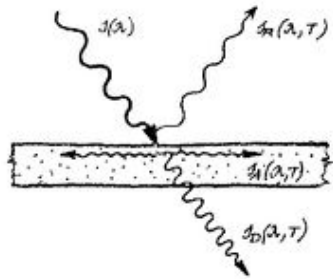
$$E(T) = \int_0^\infty \epsilon(\lambda, T) d\lambda. \quad (2)$$

Hasonlóan definiálhatjuk egy elektromágneses hullám esetében az energiaáramsűrűséget, vagy ismertebb nevén *intenzitást*:

$$I(\lambda) = \frac{\Delta E}{\Delta A \Delta t \Delta \lambda}. \quad (3)$$

A sugárzás teljes intenzitását pedig ezen infinitezimális intenzitások összegeként kapjuk:

$$I_0 = \int_0^\infty I(\lambda) d\lambda. \quad (4)$$



1. ábra. Az elektromágneses sugárzás szétbomlása anyaggal való kölcsönhatás esetén [1]

Ha a fogadó oldalt nézzük, egy testet érő elektromágneses sugárzással három dolog történhet: áteresztődik ( $I_t(\lambda, T)$ ), elnyelődik ( $I_a(\lambda, T)$ ), vagy visszaverődik ( $I_r(\lambda, T)$ ), ahogy ezt az 1. ábrán is láthatjuk. Természetesen ez a három jelenség egyszerre lép fel a kölcsönhatások legnagyobb részében, így a végbemenetelüket valamilyen arányszámmal tudjuk jellemezni:

$$\xi(\lambda, T) = \frac{I_\xi(\lambda, T)}{I(\lambda)}; \quad \xi \in \{t, a, r\} \quad (5)$$

$$\xi(T) = \frac{\int_0^\infty I_\xi(\lambda, T) d\lambda}{\int_0^\infty I(\lambda) d\lambda} = \frac{I_\xi(T)}{I_0}. \quad (6)$$

Ezeket rendre *transzmisszió*-, *abszorpció*- és *reflexióképességnek* nevezzük. Mindet tudjuk definiálni integrált esetben is, ahogy a 6. egyenletben látható. Az energiamegmaradásból következik, hogy a teljes intenzitás is megmarad, így:

$$t(\lambda, T) + a(\lambda, T) + r(\lambda, T) = 1 \quad (7)$$

$$t(T) + a(T) + r(T) = 1. \quad (8)$$

## 0.2. Az abszolút fekete test

A testek sugárzásának vizsgálatához célszerű bevezetni egy absztrakciót (valójában ilyen test nem létezik), melyet **abszolút fekete testnek** hívunk. Ennek a legfontosabb tulajdonsága, hogy minden ráeső elektromágneses sugárzást elnyel, így felírható:

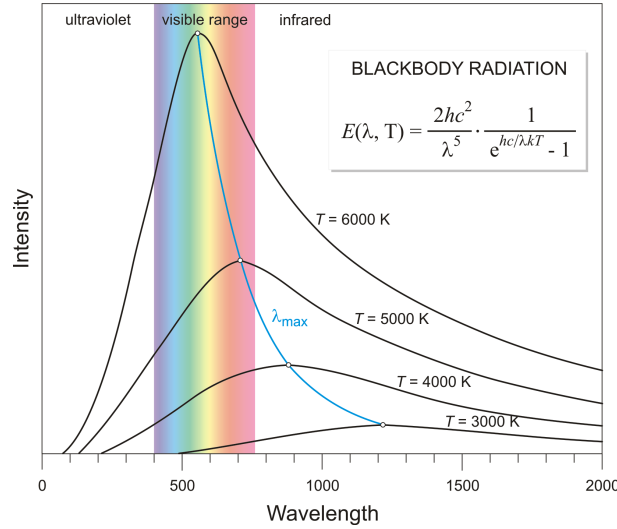
$$a(\lambda, T) = a(T) = 1 \equiv a_f. \quad (9)$$

Fontos, hogy a fekete test által kisugárzott energia spektruma elméleti megfontolásokkal levezethető (*Max Planck*, 1900 [2]):

$$\varepsilon_f(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1}, \quad (10)$$

ahol  $h$  a Planck-állandó,  $c$  a fénysebesség és  $k_B$  a Boltzmann-állandó. Ez a **Planck-féle sugárzási törvény**. A megfelelő hullámhosszfüggés néhány hőmérsékleten a 2. ábrán látható. A maximumokra érvényes továbbá a **Wien-féle eltolódási törvény**, mely szerint:

$$\lambda_{\max} \cdot T = \text{const.} \quad (11)$$



2. ábra. A fekete test sugárzás szemléltetése különböző hőmérsékleteken [3]

A felületre normált sugárzási teljesítményt az  $\varepsilon_f$  függvény hullámhossz szerinti integrálja adja meg, melyre érvényes a **Stefan-Boltzmann-törvény**:

$$E_f(T) = \int_0^\infty \varepsilon_f(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4. \quad (12)$$

Eszerint a kisugárzott teljesítmény arányos a hőmérséklet negyedik hatványával, az arányossági tényező pedig a *Stefan-Boltzmann-állandó*:  $\sigma = 5.670 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$ . Egy felületről kisugárzott teljesítmény azonban nem minden irányba azonos, annak szögfüggését a *Lambert-törvény* adja meg:

$$dE_\varphi(T) = \sigma T^4 \frac{\cos \varphi}{\pi} d\Omega, \quad (13)$$

ahol  $\varphi$  a felület normálvektorával bezárt szög,  $d\Omega$  pedig a térszög, amelyet vizsgálunk.

### 0.3. Nem fekete testek sugárzása

Két tetszőleges (1, 2) testre a tapasztalat szerint fennáll a következő összefüggés, a hőmérsékleti sugárzás *Kirchhoff-törvénye*:

$$\frac{\varepsilon_1(\lambda, T)}{a_1(\lambda, T)} = \frac{\varepsilon_2(\lambda, T)}{a_2(\lambda, T)} = \text{const.} \quad (14)$$

Mivel ez a fekete testre is érvényes, bármely testre felírható:

$$\frac{\varepsilon(\lambda, T)}{a(\lambda, T)} = \varepsilon_f(\lambda, T), \quad (15)$$

azaz az abszorpció- és emisszióképesség a másik ismeretében meghatározható.

Szerencsére sok esetben még az egyiket sem kell meghatároznunk minden  $\lambda$  értékre, mivel nem túl magas hőmérsékleten sok anyag esetében jó közelítéssel érvényes az  $a(\lambda, T) \approx a(T)$  hullámhossz-függés elhanyagolása. Az ilyen testeket *szürke testnek* hívjuk (természetesen ez nem a tényleges színre utal). Még tovább egyszerűsíthetjük a feladatot alacsony hőmérsékleten, mivel itt legtöbbször az abszorpciós tényező közel konstans, azaz  $a(T) \approx a$ .

Ezen közelítések alkalmazásával már könnyen megkapható egy test integrált emisszióképessége:

$$E(T) = \int_0^\infty \varepsilon(\lambda, T) d\lambda = \int_0^\infty a(\lambda, T) \varepsilon_f(\lambda, T) d\lambda = a \int_0^\infty \varepsilon_f(\lambda, T) d\lambda, \quad (16)$$

mely a *Stefan-Boltzmann-törvény* alapján:

$$E(T) = a\sigma T^4. \quad (17)$$

Alacsony hőmérsékletű szürke testekre igaz tehát, hogy integrált emisszióképességük csak egy konstans ( $a \in [0, 1]$ ) szorzóban tér el a fekete testétől.

## 1. Előkészületek

A mérés elején megmértük a "Stefan-Boltzmann-izzó" és az alacsony hőmérsékletű sugárforrás ("kocka") érzékelő termisztorának kezdeti, hideg ellenállását. A termisztor ellenállása multiméterrel mérve  $R_{t_0} = 84,45 \pm 0,10 \text{ k}\Omega$ -nak adódott, míg az izzó ellenállását annak kicsi volta miatt egy négyponthoz közelítő ellenállásmérővel mértük és  $R_{s_0} = 0,274 \pm 0,003 \Omega$  értéket kaptunk.

Kiszámítottuk továbbá a leírtban ([1]) mellékelt táblázatok alapján az izzó ellenállásának és a kockában és az abszorpciómérőben lévő termisztorok ellenállásának hőmérsékletfüggését. Az izzó wolframszálának esetében a szobahőmérsékletre normált ellenállás ( $\frac{R}{R_{300K}}$ ) a vizsgált tartományban ( $\approx 300\text{--}3000\text{K}$ ) jó közelítéssel lineáris függést mutat, így ilyen alakú függvényt illesztettünk rá:

$$T \left( \frac{R}{R_{300K}} \right) = (169,02 \pm 1,54) \cdot \frac{R}{R_{300K}} + (251,29 \pm 17,92) \text{ K}, \quad (18)$$

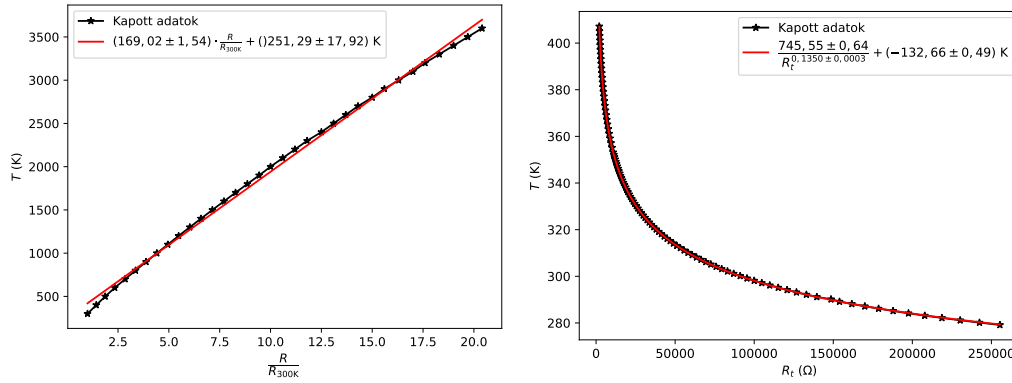
ahol a paraméterek hibáit az illesztés kovarianciamátrixából határoztuk meg.

A termisztor esetében már nem volt ilyen egyszerű dolgunk, mivel ennek tudottan nemlineáris az ellenállás-hőmérséklet karakterisztikája. Ettől függetlenül a kapott értékeket ábrázolva úgy gondoltuk, hogy a függés valamilyen hatványfüggvény szerinti lesz, a Python pedig sok ismeretlen paramétert

is jól illeszt. Az így illesztett függvény a következő lett:

$$T(R_t) = \frac{745,55 \pm 0,64}{R_t^{0,1350 \pm 0,0003}} + (-132,66 \pm 0,49) \text{ K.} \quad (19)$$

Az illesztések pontosságát a 3. ábra mutatja. Minden ezután következő feladatban ezen függésekből határoztuk meg a hőmérsékleteket a mért ellenállásértékekből.

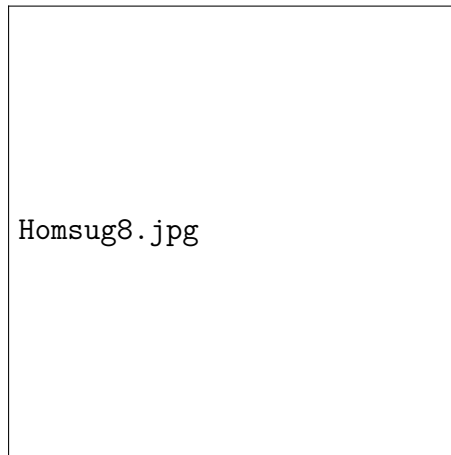


(a) A táblázatból kapott adatok és az (b) A táblázatból kapott adatok és az illesztés az izzószál hőmérsékletének ellenállásfüggésére  
 illesztés a termisztor hőmérsékletének ellenállásfüggésére

3. ábra. Az illesztett hőmérséklet-ellenállásfüggések

## 2. Stefan-Boltzmann-Törvény Ellenőrzése Magas Hőmérsékletű Sugárforrással

A méréshez szükség volt egy Stefan-Boltzmann izzóra, egy tápegységre, 3 db multiméterre, egy sugárzásdetektorra és az ehhez tartozó állványra, valamint vezetékekre. A mérési összeállítást a ?? ábra mutatja.



4. ábra. Bal oldalon a mérési összeállítás vázlata, jobb oldalon pedig a megvalósításról készült kép látható.

### 3. Pontszerű Forrás Sugárzási Intenzitásának Távolságfüggése

### 4. Stefan-Boltzmann-Törvény Ellenőrzése Alacsony Hőmérsékletű Sugárforrással

Ebben a feladatban egy alacsony hőmérsékletű sugárforrás (továbbiakban: *kocka*) emissziójának vizsgálatával ellenőriztük a *Stefan-Boltzmann-törvény* fennállását és határoztuk meg a kocka relatív emissziós (abszorpciós) tényezőjét.

#### 4.1. A mérési összeállítás



5. ábra. Mérési összeállítás a kocka emissziójának vizsgálatához

A méréshez a 4. ábrán látható módon szembe állítottuk a detektort a kockával, attól nagyjából 4 cm távolságban. A detektor feszültségét ( $U_d$ ) egy multiméteren néztük, a kocka termisztorának ellenállását ( $R_t$ ) pedig egy másikon. Kezdetben (ekkor még nem kapcsoltuk be a kocka fűtését) a kocka ellenállása  $R_{t0} = 80,13 \pm 0,10 \text{ k}\Omega$  volt. Ezután *HIGH* állásba kapcsoltuk a kocka fűtését, és megkezdtük a mérést.

#### 4.2. A mérés menete

A mérés során fél percenként forgattuk a kockát, melynek felületei így a következő sorban kerültek sorra: feketére festett, matt alumínium, fehérre festett, majd polírozott alumínium. Minden pozícióban feljegyeztük a detektor  $U_d$  feszültségét és a kocka termisztorának pillanatnyi  $R_t$  ellenállását. A mérést addig végeztük, amíg a termisztor ellenállása már nem igazán változott és a kezünknek is elég volt a forró kocka forgatásából (a kocka alja is jól felmelegedett).

### 5. Abszorpciós tényezők meghatározása

#### Hivatkozások

Fizipédia, mérési leírát

A Planck-féle sugárzási törvény



A fekete test sugárzása