

A mérési feladat¹

1900-ban Planck felvetett egy új hipotézist, miszerint a fény kibocsátása $h\nu$ nagyságú energiakvantumokban történik. 1905-ben Einstein kiegészítette ezt a feltevést: a fény a kibocsátás után is energiakvantumok formájában terjed. A fény kvantumait később fotonnak nevezték. A közönséges fény hullámfrentjai hatalmas mennyiségű fotonból állnak. A fotonok el vannak rejtve a hullámban, ugyanúgy, mint az atomok egy darab anyagban, de a h Planck-állandó felfedi létüket. Ennek a mérésnek a célja a Planck-állandó meghatározása.

Egy test nem csak kibocsátani tud fényt, hanem el is nyelheti a külvilágból érkező sugárzást. Fekete testnek nevezzük azt a testet, amely minden rá eső sugárzást elnyel, minden hullámhosszon. Ugyanakkor a fekete test tökéletes sugárzó is. A fekete test tehát minden elektromágneses sugárzást elnyel, nem ver vissza semmit, és minden hullámhosszon sugároz. A valódi testek nem teljesen feketék: a test által kisugárzott energiának és a vele azonos hőmérsékletű fekete test által kisugárzott energiának az aránya, az ε emissziós állandó, amely általában függ a λ hullámhossztól.

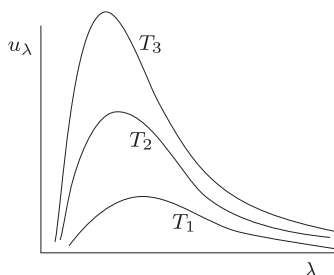
Planck megállapította, hogy egy T abszolút hőmérsékletű test által kisugárzott λ hullámhosszúságú elektromágneses sugárzás teljesítménye

$$(1) \quad u_\lambda = \varepsilon \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)}$$

alakban adható meg, ahol c_1 és c_2 állandók. Ebben a feladatban c_2 -t kell kísérletileg meghatározni, amely arányos h -val.

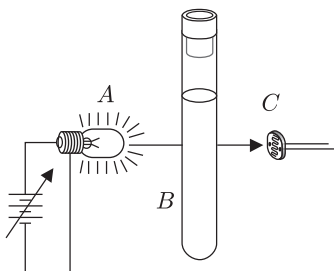
Kis λ hullámhosszak esetében, az 1. ábrán a maximális értéktől messze balra, az (1)-es képlet nevezőjéből el lehet hagyni a -1 -es tagot, és így a képlet egyszerűsödik:

$$(2) \quad u_\lambda = \varepsilon \frac{c_1}{\lambda^5 e^{c_2/\lambda T}}.$$



1. ábra

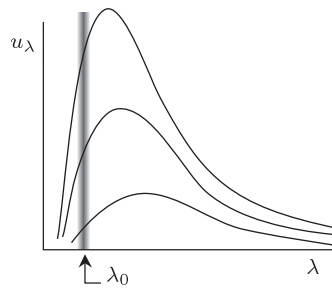
A kísérleti feladat legfontosabb elemeit a 2. ábra mutatja vázlatosan.



2. ábra

- A fényt kibocsátó test az A izzólámpa volfrám szála, amely széles λ hullámhossztartományban sugároz, és sugárzó teljesítményét változtatni lehet.
- A B kémcsőben folyékony optikai szűrő található, amely csak a fény látható spektrumának egy λ_0 körüli keskeny sávját engedi át (lásd a 3. ábrát).

¹ A feladat szövegét kicsit lerövidítve, néhány – csak a versenyen fontos – technikai részlet elhagyásával közöljük.
A mérés elvégzésére 5 óra állt rendelkezésre.



3. ábra

- Végül az átengedett sugárzás a C fotoellenállásra esik.

A fotoellenállás R ellenállása függ a megvilágítás erősségétől (E), amely viszont arányos az izzószál teljesítménysűrűségével:

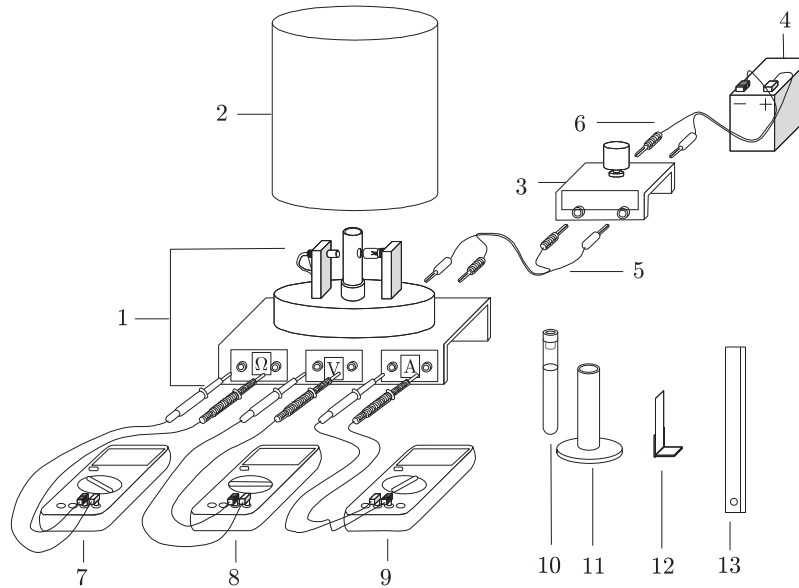
$$(3) \quad \left. \begin{array}{l} E \propto u_{\lambda_0} \\ R \propto E^{-\gamma} \end{array} \right\} \Rightarrow R \propto u_{\lambda_0}^{-\gamma},$$

ahol a fotoellenállásra jellemző γ mértékegység nélküli állandót a mérés során kell meghatározni. Végül a fotoellenállás R ellenállása és az izzószál T hőmérséklete között az

$$(4) \quad R = c_3 e^{c_2 \gamma / \lambda_0 T}$$

összefüggés adódik (c_3 ismeretlen állandó). Ha R értékét T függvényében méred, megkaphatod c_2 -t – ez a kísérleti feladat fő célja.

A berendezés részei és az egyes részek összeállításának vázlata a 4. ábrán látható.



4. ábra. 1. Alaplemez. A rajta lévő korongra van szerelve a fotoellenállás tartója, a kémcsőtartó és az izzólámpa (12 V; 0,1 A) tartója. 2. Fényvédő borítás. 3. 10-szer körbetekerhető potenciométer, teljes ellenállása 1 kΩ. 4. 12 V-os telep. 5. Fekete és piros drótok mindkét végén banándugóval, az alaplemez és a potenciométer összekötéséhez. 6. Fekete és piros drótok, egyik végükön banándugóval, másik végükön saruval, amivel a telephez lehet csatlakozni. 7. Ohmmérőként használt multiméter. 8. Voltmérőként használt multiméter. 9. Ampermérőként használt multiméter. 10. Kémcső a folyékony szűrővel. 11. Kémcsőtartó. 12. Szürke szűrő. 13. Vonalzó

1. feladat. Rajzold le a méréshez használt teljes áramkört!

Az izzószál hőmérsékletének mérése

Egy vezető szál R_B ellenállása különböző okokból függ a hőmérséklettől:

- A fém fajlagos ellenállása függ a hőmérséklettől. Kísérleti adatok alapján volfrám esetében ez a hőmérsékletfüggés 300 K és 3655 K között SI egységekben a következő módon írható le:

$$(5) \quad T = 3,05 \cdot 10^8 \rho^{0,83}.$$

- A hőtágulás miatt megváltozik a szál hossza és keresztmetszete, azonban ez a hatás ebben a kísérletben elhanyagolható, így:

$$(6) \quad T = a R_B^{0,83}.$$

- T méréséhez meg kell határozni a -t. Ezt úgy lehet megtenni, hogy megméréd $R_{B,0}$ -t a T_0 szobahőmérsékleten.

2. feladat. a) A multiméter segítségével mérd meg a T_0 szobahőmérsékletet!

b) Az izzószál T_0 szobahőmérsékleten mért $R_{B,0}$ ellenállását ellenállásmérővel nem lehet jól mérni, mert az ellenállásmérő egy kicsiny, ismeretlen áramot bocsát az izzóra, amely ennek hatására felmelegszik. Ehelyett $R_{B,0}$ meghatározásához vedd fel az izzó $I(U)$ karakterisztikáját! Határozd meg minden egyes U és I értékpár esetében R_B értékét, és ábrázold grafikusan R_B -t I függvényében!

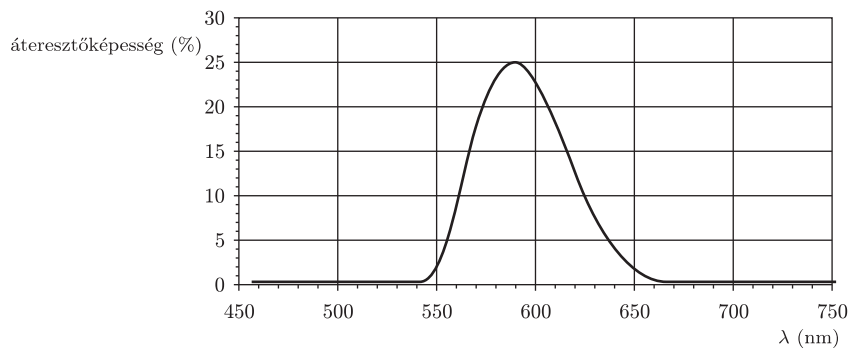
c) A grafikonon válaszd ki a megfelelő tartományt, amire extrapolációra alkalmas egyenest illeszthetsz. Ennek az egyenesnek és a függőleges tengelynek a metszéspontja megadja $R_{B,0}$ értékét.

d) Számold ki a és Δa számszerű értékét a (6) egyenlet felhasználásával!

Az optikai szűrő tulajdonságai

A kémcsőben lévő folyékony optikai szűrő rézszulfát só és narancs anilin festék vizes oldatának megfelelő keveréke. A só szerepe az izzó által kibocsátott infravörös fény elnyelése.

3. feladat. Határozd meg λ_0 és $\Delta\lambda$ értékét a mellékelt ábra alapján!



A fotoellenállás tulajdonságai

A fotoellenállás anyaga sötétben nem vezeti az áramot. Megvilágítás hatására töltéshordozók aktiválódnak, és az ellenálláson áram folyhat keresztül. A fotoellenállás ellenállása a következő képlettel fejezhető ki:

$$(7) \quad R = bE^{-\gamma},$$

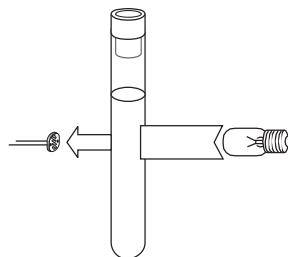
ahol b a fotoellenállás összetételétől és méreteitől függő állandó, γ pedig egy mértékegység nélküli paraméter. Elméleti megfontolások alapján, egy ideális fotoellenállásra $\gamma = 1$, azonban, sok különböző hatás eredményeképp, valódi eszközök esetében $\gamma < 1$, így szükség van γ meghatározására.

Ezt úgy lehet megvalósítani, hogy először egy meghatározott E megvilágításához tartozó R értéket kell megmérni (5. ábra), majd a lámpa és a kémcső közé egy ismert fényáteresztőképességű szürke F szűrőt kell helyezni (6. ábra). A szűrő behelyezése után a megvilágítás $E' = 0,512E$ lesz. Az ehhez a megvilágításhoz tartozó R' ellenállás megmérése után:

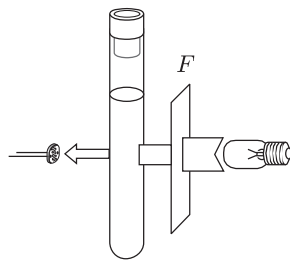
$$(8) \quad R = bE^{-\gamma}; \quad R' = b(0,512E)^{-\gamma}.$$

Ebből

$$(9) \quad \ln \frac{R}{R'} = \gamma \ln 0,512.$$



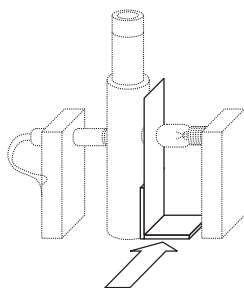
5. ábra



6. ábra

4. feladat. a) Győződj meg róla, hogy a fotoellenállás ennek a feladatnak az elkezdése előtt legalább 10 percig teljes sötétben volt! Csatlakoztasd az elemet a potenciométerhez, és a gomb finom csavarásával lassan növeld a lámpa feszültségét! Olvass le összetartozó feszültség (U) és áram (I) értékeket a 9,50 V és 11,50 V közötti feszültségtartományban, és olvasd le a fotoellenállás R ellenállás értékeit is!

b) Amikor elérted a legkisebb R ellenállást, nyisd ki a védőtetőt, tedd be a szürke szűrőt a 7. ábrának megfelelően, fedd le újra a védőtetővel és olvasd le a fotoellenállás új R' ellenállását! Ezeknek az adatoknak a felhasználásával a (9) egyenlet alapján határozd meg γ és $\Delta\gamma$ értékét!



7. ábra

c) Módosítsd a (4) egyenletet úgy, hogy $\ln R \propto R_B^{-0,83}$ lineáris függvénye legyen!

d) A mérési adatokból készíts ennek az egyenletnek az ábrázolásához táblázatot!

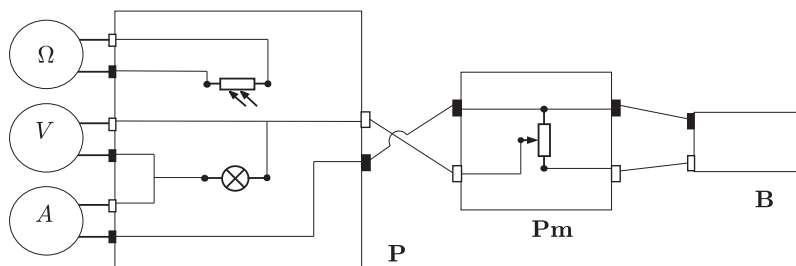
e) Készítsd el a grafikont, és – felhasználva, hogy $c_2 = hc/k$ – számítsd ki h és Δh értékét!

(Fénysebesség: $c = 2,998 \cdot 10^8$ m/s; Boltzmann-állandó: $k = 1,381 \cdot 10^{-23}$ J/K.)

A mérési feladat vázlatos megoldása

A mérés célja a Planck-állandó meghatározása egy izzólámpa fényének vizsgálata alapján. Sajnos a feladat szövege a legapróbb részletekig lebontva megadta a versenyzők által elvégzendő feladatokat. Egyéni ötletre, kreativitásra nem nagyon volt szükség. A javításnál viszont az elvárásoktól való legkisebb eltérést (pl. eggyel több vagy kevesebb értékes jegy kiírása, a hiba kicsit eltérő becslése) pontlevonással büntettek.

Az **1. feladat** a mérési összeállítás kapcsolási rajzának elkészítése volt:



A **2. feladat** az izzószál hőmérsékletének mérése. A szál T hőmérséklete és R_B ellenállása között a fém fajlagos ellenállásának hőmérsékletfüggése miatt a $T = aR_B^{0,83}$ összefüggés áll fenn. Az a mennyiség meghatározásához meg kell mérni a szobahőmérsékletet (T_0) és az izzó ellenállását szobahőmérsékleten ($R_{B,0}$). T_0 közvetlenül mérhető multiméter segítségével, $R_{B,0}$ értékét pedig extrapolációval lehet meghatározni: Az izzólámpa $I(U)$ karakterisztikájának felvétele (összetartozó $I-U$ adatpárok megmérése) után az izzó R_B ellenállását I függvényében ábrázolva megfigyelhető, hogy kis áramoknál az ellenállás közel lineárisan változik az áramerősséggel. Ezekre a pontokra egyenest illesztve az egyenes és a függőleges tengely metszéspontja megadja $R_{B,0}$ értékét. T_0 és $R_{B,0}$ ismeretében a meghatározható.

Az egyenesillesztéshez a rendezők külön, statisztikus számolásokhoz is alkalmas számológépet adtak. A grafikus illesztést nem fogadták el. (Ha T -t K-ben és R_B -t Ω -ban mérjük, $a \approx 40$ adódott.)

A **3. feladat** nem igazi mérési feladat: a szűrő által átengedett fény hullámhosszát és ennek hibáját egy megadott grafikonból – annak maximumhelyéből és félértékszélességéből – kellett kiolvasni: $\lambda_0 = 590 \text{ nm}$, $\Delta\lambda = 28 \text{ nm}$.

A **4. feladat** a fotoellenállás vizsgálata és h értékének meghatározása. A fotoellenállás ellenállása az E megvilágítás függvényében az $R = bE^{-\gamma}$ képlet szerint változik. A γ állandó úgy határozható meg, hogy a megvilágítást egy szürke szűrővel $E' = 0,512E$ nagyságúra csökkentjük. Ekkor

$$\gamma = \frac{\ln(R/R')}{\ln 0,512}$$

két ellenállásmérésből megkapható ($\gamma = 0,7$).

A feladat szövegében megadták a Planck-féle sugárzási törvényből és a fotoellenállást leíró fenti összefüggésből levezetett $R = c_3 e^{c_2 \gamma / \lambda_0 T}$ képletet, amely a fotoellenállás ellenállását adja meg az izzószál hőmérsékletének függvényében.

A feladat a képletben szereplő $c_2 = \frac{hc}{k}$ állandó meghatározása – amiből már a c fénysebesség és a k Boltzmann-állandó ismeretében a h Planck-állandó meghatározható.

Felhasználva, hogy $T = aR_B^{0,83}$, és a képletet linearizálva az

$$\ln R = \ln c_3 + \frac{c_2 \gamma}{\lambda_0 a} R_B^{-0,83}$$

összefüggést kapjuk. Ha $\ln R$ -t $R_B^{-0,83}$ függvényében ábrázoljuk (ahol $R_B = \frac{U}{I}$), az egyenes meredeksége $\frac{c_2 \gamma}{\lambda_0 a}$, amiből γ , λ_0 és a ismeretében c_2 (abból pedig h) kiszámolható.

Ehhez összetartozó U , I és R értékeket kell mérni, $R_B = \frac{U}{I}$, $R_B^{-0,83}$ és $\ln R$ értékét ki kell számolni, majd az $\ln R - R_B^{-0,83}$ grafikon pontjaira egyenest kell illeszteni. A hivatalos megoldás szerint h értékét kb. 5%-os hibával lehetett megkapni.

A feladat nehézségét – a túl részletes útmutatónak köszönhetően – elsősorban a sok adat leolvasása, táblázatba foglalása, grafikus ábrázolása, az egyenesillesztések és a hibák kiszámolása jelentette.