

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

A Matematikai és Természettudományi Értesítőt az Akadémia 1882-ben indította
A Matematikai és Fizikai Lapokat Eötvös Loránd 1891-ben alapította

LXIII. évfolyam

1. szám

2013. január

ESSZÉ A MÉRÉSEKRŐL, AMELYEK A PLANCK-TÖRVÉNY FELFEDEZÉSÉHEZ VEZETTEK – 1. RÉSZ

Jánossy Lajos emlékének, aki megtanított a kísérleti munka megbecsülésére

Varga Péter
KFKI

Az ezredfordulóval együtt ünnepeltük *Planck* sugárzási törvénye, a kvantumelmélethez vezető első lépés felfedezését. Joggal kapott dicséretet az a spirituális teljesítmény, amely a törvény megalkotásához vezetett, de akkor alig esett szó arról, hogy mekkora jelentősége volt az experimentális munkának. Pedig ahhoz, hogy alapvetően más, a tudomány eddigi eredményeit felülmúló, szinte új világgépet követelő ismeretek szülessenek, olyan tapasztalatok kellene, amelyeket eddigi tudásunkkal már nem tudunk megmagyarázni. Planck a törvényt *mérések eredményeinek ismeretében fogalmazta meg*, és egy merőben új feltevés, a kvantumhipotézis alapján értelmezte. Ugyanez történt a századfordulót megelőző évek két nagy felismerésével is: a fotoeffektus vizsgálata során tapasztalt jelenségek magyarázatával (*Einstein*) és a hidrogén-spektrum értelmezésével (*Bohr*). A régi elmélet már nem volt elegendő az új tapasztalatok befogadására, ezért lett szükség új törvényekre. Máskor is így történt. *Newton*hoz *Tycho Brahe* és *Kepler*, továbbá *Galilei* is kellett.

Az évforduló kapcsán a *rációt* ünnepeltük, méltán. Ha szó is volt arról, hogy a kísérlet megelőzte az elméletet, az *empíria* nehézségei már mellékes körülménnyé váltak. Mert mi kellett a méréshez? Csupán egy forrás, amely fekete sugárzást bocsát ki, egy monokromátor, amely elvégzi a spektrális bontást, és egy detektor, amely megméri az adott hullámhosszon az elektromágneses hullámok teljesítményét. A valóságban izgalmas, krímibe illő bonyodalmak árán jutottak el az igazsághoz. Mivel félő, hogy a Tisztelt Olvasó megvárja, amíg a teljes cikk megjelenik, és megnézi a végét, közlöm a célhoz vezető út főbb fázisait.

• 1896: *Wien* közli sugárzási képletét – nem alaptalan megfontolások alapján.

• 1896–1899: *Paschen* a közeli infravörösben végzett mérései során olyan tapasztalati formulához jut, amelyből következik *Wien* sugárzási képlete.

• 1897–1900: *Planck* részletesen tanulmányozza az olyan üreg belsejében kialakuló elektromágneses sugárzást, amikor az üreg belsejében a sugárzással kölcsönhatásban levő rezonátor is van. Fokozatosan előre haladva felírja a sugárzási tér entrópiáját, és egyre meggyőzőbb bizonyítást talál *Wien* sugárzási képletére.

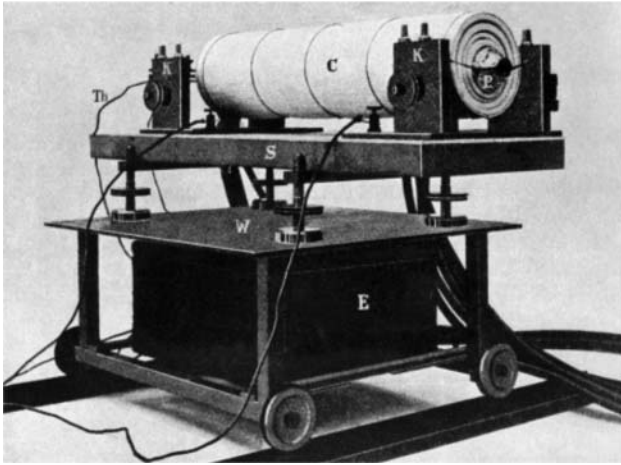
• 1899–1900: *Lummer* és *Prigsheim* izotermákat mérve igazolja, izokromátákat mérve cáfolja *Wien* törvényét. A kétféle eredményt nem kommentálják.

• 1900. október: egészen új elven működő, fényerős monokromátor segítségével *Rubens* és *Kurlbaum* kiterjeszti a méréseket a távolabbi infravörösbe. *Wien* formuláját cáfoló eredményt kapnak. *Planck* elfogadja ezt a mérést, és úgy módosítja az entrópia kifejezését, hogy a méréshez illeszkedő formulát kapjon, a *Planck-törvényt*. Baj még mindig van, mert a mérések *Rayleigh* képletével (figyelem, nem a „*Rayleigh*”–*Jeans* törvénnyel) is összhangban vannak.

• 1900. november: *Planck* olyan statisztikus modellet állít fel, amelyben az üregben levő rezonátorok az energiájukat *hν* adagokban veszik fel és adják le, továbbá a rezonátorok még megkülönböztethetetlenek is, mindebből ahhoz az entrópiához jut, amely a *Planck-törvény*hez vezet.

• Az 1900-as év vége: *Lummer* és *Prigsheim* megmutatják, hogy *Rayleigh* képlete nem írja le a sugárzást a közeli infravörös tartományban.

A fekete sugárzás törvénye *alapegyenlet*, amely megadja, hogy egy zárt üregben, amelynek falai azonos hőmérsékleten vannak, hogyan függ az elektromágneses sugárzás spektruma a falak hőmérsékletétől, mint egyetlen paramétertől. Egy alapegyenletet sokféle mó-



1. ábra. Lummer és Kurlbaum feketetest-kísérleti berendezése 1898-ból. Platinahengereket helyeztek kerámiacsövekbe.

don lehet meghatározni, például *tapasztalat* alapján. Az ideális gáz $pV = RT$ törvénye két, már ismert összefüggés, a Gay-Lussac- és a Boyle–Mariott-törvény összesítése. Eljuthatunk az alapegyenlethez *elméleti* úton is, elemi folyamatok általánosítása révén. Végül többekévesébe következetes megfontolások útján a törvény *kitalálható*, és majd a tapasztalat eldönti igaz-e. Akár így, akár úgy jutunk el az alapegyenlethez, meg kell keresni azokat az elemi folyamatokat, amelyek a tapasztalat tárgyához vezetnek. *Maxwell* és *Boltzmann* a mechanikára támaszkodva ezt tették.

Planck a fordított úton próbált haladni. A rendezetlen mozgást végző molekulák helyett elektromágneses, rendezetlenül elnyelődő és kisugárzott hullámok sokaságát vizsgálta. Törekvése nem járt totális kudarccal, de sikerrel sem. Manapság már megemlítik (a szerző diákkorában még nem, és sokáig utána sem), hogy Planck nevezetes törvényét Lummer (1. ábra) és a többiek kísérleteinek eredményei nyomán tapasztalati törvényként írta fel. Azonban Paschen kísérletei, amelyek megelőzték Lummerék munkáját, még a hibásnak bizonyult Wien-formulát igazolták, és Planck nem csupán a teoretikus belső indítatása alapján próbálta négy év munkájával Wien sugárzási formuláját bebizonyítani (lásd *Simonyi Fizika Kultúrtörténetét*), hanem a kísérleti eredmények hatása is szerepet játszhatott ebben. Azután éppen a kísérleti eredmények hatására tette meg az első lépést az új úton.

Kísérleti fizikus vagyok, ezért élvezettel követtem nyomon az elmélet és a kísérlet izgalmas dialektikáját. Megpróbáltam a kor emberének fejével gondolkodni, és megérteni, miért mozdult az egyik irányba és nem a másikba. Ha meg is indoklom lépéseik okát, következtetésem természetesen visszamenőleges kitaláció.

A történet konklúziója: Egy kísérletet nem lehet befejezni, csak abbahagyni. A Wien-formulát igazoló mérések nem voltak rosszak, csak *kevésék*, de nem a mérés statisztikus vagy szisztematikus hibái, hanem a kiválasztott hullámhossztartomány szűk volta miatt. Ezzel már el is árultam a poént, a Planck-törvény numerikus analízise megmutatja az olvasónak, hol *volt* érdemes mérni. Köz hely, de utólag könnyű okosnak lenni.

A kezdetek (Kirchhofftól Wienig)

Kirchhoff elméleti megfontolásai (nevezhetjük ezeket gondolatkísérletnek is) révén tudjuk, hogy egy zárt üregben – amely falának legalább egy része elnyelő és a fal mindenütt azonos hőmérsékleten van – izotróp és polarizálatlan sugárzás alakul ki, amelynek spektrális összetétele független az üreg alakjától és a falak anyagától. Ezért a sugárzó energia sűrűsége, valamint ennek spektrális eloszlása – a következőkben $u(\lambda, T)$ – kizárólag a hőmérséklet függvénye. Az anyag- és alakfüggetlenség megkönnyíti annak a dolgot, aki az elmélet vagy kísérlet alapján akarja meghatározni a spektrumot, mert elég egy speciális, könnyen kezelhető modellel elvégezni a számolást vagy a mérést, és az eredmény minden más esetben is igaz lesz. (A mérések elvégzésénél már kénytelenek vagyunk engedményt tenni, az üreg falát meg kell fürni, hogy a kisugárzott energia áramát mérhesük, a lyukat pedig kicsire kell választani az üreg falának felületéhez képest.)

Kirchhoff amellett, hogy bebizonyította egy ilyen univerzális függvény létezését, felállította a hőmérsékleti sugárzásnak az anyag partikuláris tulajdonságait is tartalmazó fontos törvényét. Legyen $e(\lambda, T; \mathbf{s})d\lambda$ az energiafluxus, amelyet egy T hőmérsékletű, konkrét anyagi tulajdonságokkal rendelkező test az \mathbf{s} irányban a λ és a $\lambda+d\lambda$ hullámhossz-intervallumban emittál, röviden az emisszióképesség. Legyen $r(\lambda, T; \mathbf{s})$ a reflexióképesség, amely azt adja meg, hogy egy adott felület a rá minden irányból beeső energiából mennyit szór vissza az \mathbf{s} irányba (feltételezve, hogy a beeső sugárzás izotróp)! Ezzel Kirchhoff törvénye:¹

$$\frac{e(\lambda, T; \mathbf{s})}{1 - r(\lambda, T; \mathbf{s})} = u(\lambda, T), \quad (1)$$

tehát két mennyiségnek, amelyek az emittáló-elnyelőszóró anyag tulajdonságaitól és a szórás iránytól függenek, hányadosa univerzális függvény, amely már csak a hőmérséklettől és a hullámhossztól függ. Következésképpen egy alakzat, amelyik egyáltalán nem veri vissza a fényt, univerzális sugárzást emittál, amelyet fekete sugárzásnak nevezünk.

A fekete sugárzásra vonatkozó első mérési eredményt *Tyndall* produkálta: megmérte a teljes spektrumban kisugárzott fluxust. A mérés alapján *Stefan* megállapította, hogy a teljes U energia a hőmérséklet negyedik hatványával arányos:

$$U = \sigma T^4. \quad (2)$$

Erre Boltzmann adta az elméleti magyarázatot 1884-ben. Feltételezte, hogy a sugárzás nyomást gyakorol az üreg falára. Egyáltalán, a fénynyomás létezésének feltételezése is merész tett volt. Ugyan következett

¹ Kirchhoff törvényét egyszerűsített alakjában szokták idézni, bár Kirchhoff gondolatkísérleteiből (1) következik [1], és ezt a formáját ki is fogjuk használni.

Maxwell elméletéből, de csak később, 1888–89-ben bizonyította be *Hertz*, hogy elektromágneses hullámok igenis léteznek. Sőt azt, hogy még a fénynyomás is létezik, csak 1900-ban sikerült *Lebegyevnek* kimutatnia.²

A sugárzás spektrumának leírásához vezető úton fontos eredménye volt Wiennek az eloszlási függvény alakjára vonatkozó törvénye. Bebizonyította (1894), hogy a spektrális energiasűrűség

$$u(\lambda, T) = \frac{\text{konst}}{\lambda^5} F\left(\frac{1}{\lambda T}\right). \quad (3)$$

Ezzel Wien szűkítette a lehetséges összefüggések körét, törvényét *eltolási törvénynek* nevezzük. Jelentése: ha egyszer megismerjük az F függvény alakját, mondjuk fix hullámhossz mellett, akkor könnyű átskálázni egy másik hullámhosszra és fordítva. Tehát elegendő egyetlen hullámhosszon vagy hőmérsékleten – elmélet vagy kísérlet alapján – meghatározni, hogyan függ az energiasűrűség a másik, megmaradt változótól. Természetesen a jó fizikus a másik, fixen tartott paramétert ezután megváltoztatja, és megismétli a mérést. Látni fogjuk, hogy így is történt.

A (3) törvényből további két, mérésekkel ellenőrizhető összefüggés születik:

a) Ha az energiasűrűséget a hullámhossz függvényének tekintjük fix hőmérséklet mellett, akkor az energiasűrűség maximumának λ_{\max} helyére fennáll

$$\lambda_{\max} T = A, \quad (4)$$

b) az energiasűrűség maximális értéke

$$u_{\max} T^5 = B, \quad (5)$$

ahol A és B állandók. Mivel a (3) eltolási törvényben nem kételkedünk, a (4) és az (5) összefüggés módot nyújt arra, hogy mérőberendezésünket ellenőrizzük, és még számszerű adatokat is nyerjünk. Ha ezeket nem találjuk állandónak, és bízunk a termodinamikában, akkor a berendezés rossz, ha állandók, akkor talán jó. A későbbiekben ismertetendő spektrális mérések szerzői mind ezzel kezdték, mintegy bemelegítésként. Az ellenőrzést és az adatnyerést megnehezíti, hogy egy szélsőérték helye nehezen mérhető pontosan, a hőmérsékletmérés hibája pedig megszorozódik.

Most már csak az univerzális F függvény alakját kellett megtalálni. Wien ezért továbbmegy, explicit alakban is felírja a törvényt [2]. Dolgozata bevezetésében kijelenti: bár a spektrális energiasűrűség pusztán az elektromágneses elmélet alapján meghatározható, de az erre irányuló tevékenysége nem járt sikerrel.

² Csupán véletlen, de érdekes, hogy Maxwell elektromágneses *hullám* elméletére akkor került fel a végső argumentum, amikor felfedezték az ellenkezőjét. Az már nem véletlen, hogy Hertz a folytonos, elektromágneses hullámok létezését bizonyító mérésekben vette észre elsőként a fotoeffektus hatását.

Ezért fordított eljárást követ: felállít egy hipotézist, azután ennek alapján felírja a keresett formulát, és a tapasztalatra bízva, hogy igazolja vagy megcáfolja a formulát, ezzel verifikálja vagy megdönti a kiinduló feltevést. Nem részletezzük, hogyan jutott el a hipotéziséhez Wien, de az nem volt alaptalan. Végeredményben

$$u(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda T}\right), \quad (6)$$

ahol c_1 és c_2 állandó. A (6) összefüggést a továbbiakban Wien sugárzási törvényének fogjuk nevezni. *Most már csak a kísérleti fizikusokra vár, hogy igazolják.* Teljes igazolásnak azt tekinthetjük, ha megmérjük az energia vagy azzal arányos mennyiség eloszlását, ha nem is a teljes, végtelen széles spektrumban, de mindenütt, ahol van mérhető spektrális energia. A Wien-törvényből következik az is, hogy a c_2 állandó és az eltolási törvényből kapott (4) összefüggésben szereplő A állandó között fennáll

$$c_2 = 5A. \quad (6a)$$

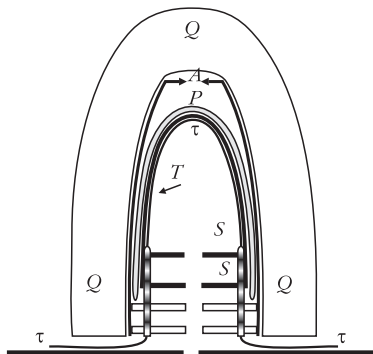
Ez még egy lehetőség az ellenőrzésre, ha a maximum helyének kísérleti megállapítása mellett módot találunk a c_2 állandó mérésére is. Találunk majd erre példát. (Azt viszont ne várjuk, hogy a Planck-törvény majd gyökeresen más eredményt ad mint (6a), mert ez majd csak keveset módosul: $c_2 = 4,965A$, a numerikus tényező eltérése a mérési pontosság határán belül marad.)

Mit, mivel és hogyan kellett mérni?

A sugárzás forrása

Az elméleti fizikus elképzel egy ideális állapotot, amelyben létrejön mindaz, amit tanulmányozni kíván. Nem is tehet mást, mert ha minden mellékkörülményt figyelembe venne, akkor a probléma megoldhatatlannul bonyolulttá válna. A kísérleti fizikus megpróbál olyan körülményeket teremteni, amelyek legalább megközelítik az elmélet kiindulópontjával szolgáló állapotot. Arra is törekszik, hogy mérőeszköze minél egyszerűbb legyen, akkor kevesebb a hibaforrás. A pénze, sajnos mint mindig, kevés. Kényszerű kompromisszumait igyekszik megvédeni.

A legegyszerűbb egy fekete anyagból készített fényforrás, csak arra kell törekednünk, hogy hőmérséklete egyenletes legyen. A recept: végy egy fémszalagot, vigyél fel a szalagra fekete színű anyagot, célszerűen oxidot, mert ez már nem oxidálódik tovább. Izzítsd a szalagot árammal. Célszerű fém a platina, mert ez magas hőmérsékleten sem oxidálódik. A szalag hőmérséklete állandó (a szélektől eltekintve, mert ott a levegő jobban hűti). De nincs olyan anyag, amelyik egy keveset ne reflektálna. A válasz: az nem baj, csak reflexióképessége ne függjön hullámhossztól, akkor *Kirchhoff tétéle* (1) alapján a kisugárzott fény



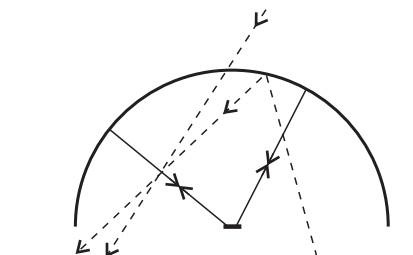
2. ábra. Paschen sugárzó ürege. T réz- vagy platinatégely, ez az üreg fala, S diafragmák ugyanabból az anyagból, P vékonyfalú porcelántégely, A platinafólia, mint elektromos fűtőest, Q azbesztburrok, τ termoelem.

intenzitása arányos a fekete test belsejében lévővel. Viszont azt már tudták, hogy a laboratóriumban elérhető hőmérsékleten izzó testek a legtöbb energiát az infravörös-tartományban bocsátják ki. Tehát azt is fel kell tenni, hogy a reflexió nemcsak a látható tartományban kicsi, hanem az infravörösben is. Szemcsés korom esetén ez a feltevés triviálisnak látszik, de homogén oxidnál – sima felületnél – már nem. (Szerencsére akkor még nem volt aszfaltút sem, mert a fekete aszfalt távolról már csillog, tehát nagy szögű beesésnél tükrözően reflektál.)

Wien és Lummer (elméleti-kísérleti páros!) fekete test után kutatván először szintén fekete szalagra gondolt [3], hiszen látható is volt, hogy a néhány mikron vastag platinaszalagra felvitt kis méretű koromfolt már jobban világít, mint a körülötte levő platina. De azt is észrevették, hogy az izzó hátlap folttal szemben levő része sötétebb lett, mint a környezete. Ugyanis azon a helyen alacsonyabb lett a hőmérséklet, mert az előresugárzó fekete folt jobban hűtötte a szalagot. Mivel a szerzők szerint nem lehetett egyenletesen vastag fekete réteget készíteni, az egyszerű megoldást elvetették, és egy érdekes kanyarral tértek rá a jobbra. Példának vették az izzó platinát, amely ugyan jó visszaverő, de: „Ha gondoskodunk arról, hogy a sugárzó test sugárzásának azt a részét, amellyel ez kevesebbet emittál, mint egy azonosan temperált fekete test, pótoljuk a beeső sugárzásból reflektált résszel, akkor ez a teljes sugárzást illetően úgy fog viselkedni, mint egy abszolút fekete test.”

Egy bekezdés erejéig kanyarodjunk vissza Kirchhoffhoz. Ő előbb azt állapította meg, hogy az egyenletes falhőmérsékletű üreg belsejében a sugárzás füg-

3. ábra. A feketetest-megoldás a geometriai optika felhasználásával.



getlen az anyag falának anyagától, és innen következett arra, hogy egy test, amely minden hullámhosszon elnyeli a beeső fényt, csupán a hőmérséklettől függő sugárzást bocsát ki. Majdnem ilyen az az üreg, amelynek falán csak a belső felület nagyságához képest kicsiny lyuk van, mert a kis lyuk csak kevésbé bontja meg az egyensúlyt. Ha pedig kívülről tekintjük a lyukas falú üreget, a lyuk azért látszik feketének, mert a kívülről beeső fényt a fal részben elnyeli, részben szórja. Csak nagyon kevés visszaszórt fény lép ki a kis lyukon, mert a többi az üreg falára esik, itt részben elnyelődik, részben újra szóródik, ebből egy kevés megint kilép, és így tovább. A lyuk majdnem teljesen fekete. (Arról, hogy egy üreg falán levő kis nyílás valóban fekete, érdemes meggyőződni. Ragasztunk össze nagyon feketének látszó papírlapot egy fehérrel, és készítsünk ebből kockát úgy, hogy a fekete oldal legyen kívül. Fúrjunk rá kis lyukat. Látni fogjuk, hogy a nyílás sötétebb, mint a körülötte lévő fekete papír, dacára annak, hogy a belső fal fehér, de nem tökéletesen fehér.)

A követelményeknek megfelelő fekete testet mutatunk be a 2. ábrán [4]. Az üreg falának felülete mintegy 60 cm^2 , a kerek lyuk átmérője 5 mm volt. (Kérem, hogy ezt a méretet jegyezze meg az olvasó!) Az üreg fala réz volt, amelyet fekete oxidréteg takart. Magasabb hőmérsékleten platina kályhát használtak, és vékony falú porcelántégelyt helyeztek belülre. Paschen a hőmérsékletet az üregbe benyúló termoelemmel mérte. A 2. ábrán látható két diafragma egyrészt csökkentette a beeső sugárzást, másrészt meghatározta a kilépő fénykúpot. Bár az árammal izzított fémfóliában az áramsűrűség nem volt homogén, tehát a disszipált hő sem volt az, a hőmérséklet viszont a hővezetés és a sugárzás révén ki tudott egyenlítődni. Erre nézve Paschen közölt egy megnyugtató megfigyelést, ami jó kísérletezőre vall: ha az üregben a sugárzás hőmérsékleti egyensúlyban van a fallal, akkor az üregbe néző megfigyelő nem láthatja a fényes felületű termoelem drójtait. Aki nem tudta, hol van a drót, nem is látta. Úgy látszik, a beavatott látta, vagy látni vélte, de a jó kísérletező nem bízik a saját szubjektumában. (Nehéz megmutatni, hogy valami nincsen.)

Az eszköz eleget tesz a következő kritériumoknak:

- a nyílás mérete jóval kisebb, mint a fal felülete,
- a fal anyaga nem tükröző,
- a fal mindenütt azonos hőmérsékleten van,
- az üregbe kívülről nem juthat be számottevő sugárzás.

Paschen kitalált egy másik fekete fényforrást is [4], amely majdnem pontosan meg is felelt a Wien és Lummer által felvetett követelménynek: a sugárzást, amit a sugárzó felület reflektál, vissza kell juttatni a felületre. A megvalósított modellt több kísérletében ki is használta. Fűtött, vasoxiddal bevont platinaszalagot helyezett polírozott vas félgömb gömbi középpontjába (3. ábra). A félgömb, mint tükör, önmagába képezi le a szalagot, tehát a fény visszajut a forráshoz. Ez zárt út. Ha a félgömb anyagának reflexióképessége 100% lenne, akkor ezt az elrendezést is tekinthetnénk

majdnem zárt üregnek, hiszen nem távozhat belőle energia, csak a gömb tetején a megfigyelésre szánt kis lyukon. Csupán ezt a kis veszteséget pótolná a szál izzítása. Most viszont van veszteség, a tükör melegszik, ezt is kívülről kell pótolni. A külvilág sugárzásától való izoláltság viszont fennáll, mert az a fény, ami kívülről esik be a félgömbre, a visszaverődés után elkerüli a szalagot, és zavartalanul távozik (3. ábra). Ha a fénysugár a megfigyelés oldaláról esik be a lyukon keresztül, akkor meg nem esik az izzó testre, kivéve egy kis térszöget. Azt, ami a kis térszögéből mégis a világító testre esik, azt a szalag diffúz módon szórja. Ezt az elrendezést a továbbiakban optikai feketetestnek nevezzük.

Ha már megvan a sugárzás forrása, mérni kell a hőmérsékletét. Ezt szerencsére pontosan tudták, mert a később ismertetett kísérleteket Berlinben vagy annak közelében végezték. A berlini Physikalisch-Technisches Reichanstalt (Birodalmi Fizikai-Technikai Intézet) egyik fő tevékenysége volt a hőmérsékletmérés módszereinek kidolgozása, és egyes fix pontok elhelyezése az abszolút, *termodinamikai skálán*. (A gáz-hőmérők nem ideálisak, sőt magas hőmérsékleten nem is használhatók.) Viszont, ha már mások megmérték egyes tiszta anyagok olvadás- vagy forráspontját, az már biztos támasz lett az egyszerűbb, könnyen kezelhető hőmérők kalibrálásához. Paschen például víz, kén, anilin forráspontjával, ezüst, arany, palládium és platina olvadáspontjával kalibrálta a termoelemait [4, 5]. Alacsonyabb hőmérsékleten a hőmérséklet stabilitását azzal is elérték, hogy az üreget forrásban levő vízzel, vagy más, kritikus hőmérsékleten levő anyaggal vették körül.

Tegyük fel, hogy van fekete testünk, most már mérni kell, mégpedig az üregben kívül. Mivel a sugárzás homogén, az intenzitás (az energiaáram) spektrális sűrűsége is az. Értéke, ha vákuumban (vagy levegőben) vagyunk

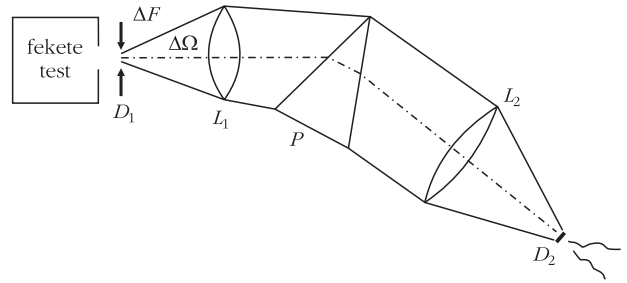
$$i(\lambda, T) = \frac{u[\lambda, T]}{c},$$

ahol c a fénysebesség. Ez az intenzitás lép ki az üregből a falra merőleges irányban. Intenzitás alatt az egységnyi felületen, egységnyi térszögben, egységnyi idő alatt áthaladó, az egységnyi hullámhossz-intervallumhoz tartozó sugárzó energiát értjük. A mérhető mennyiség a fény teljesítménye, amely

$$I(\lambda, T) = i(\lambda, T) \Delta F \Delta \Omega \Delta \lambda, \quad (7)$$

ahol ΔF a feketetest nyílásának az a része, amelyről a sugárzás a detektorra jut, $\Delta \Omega$ az a térszög, amelyen belül az optika összegyűjti ezt a sugárzást, $\Delta \lambda$ az optika által kivágott hullámhossz-intervallum. Mindegyik véges mennyiség,³ a mérés során *állandó értéken kell őket tartani*, ha lehet. Ekkor nem is kell számolni

³ A tankönyvekben inkább a $dF d\Omega d\lambda$ jelölést használják, mintegy szuggerálva, hogy ezek kicsik. Jó is lenne, ha mindig azok lehetnének.



4. ábra. A monokromátor sémája.

velük, csupán arányossági tényezőként szerepelnek. Ha nem, például, ha kicsi a teljesítmény, és ezért megnövelik a felületet (volt erre példa), akkor ezt figyelembe kell venni.

Az optika

Mérni a hullámhossz és a fekete test hőmérsékletének a függvényében kell, ezért az üreg kilépő nyílása és az energiamérő közé monokromátort kell beiktatni. Az izzó testek spektrumának tanulmányozásából tudták, hogy a földön elérhető hőmérsékletek mellett (abban a korban 2000 K alatt) a maximum az 5-10 μm tartományba esik.

Az szerzők keveset írtak az optikáról. Azért próbálom az optikai részleteket rekonstruálni, mert egyes mérések eredményének értékelésénél erre szükségünk lesz. Sőt, a mindent eldöntő méréseknél éppen az optika apparatív problémáinak gyökeres megoldása vezetett eredményhez.

Az infravörös technika különleges eszközöket és anyagokat követelt. Lencse helyett tükröket kellett használni. Prizma céljára kicsi volt a választék, mert a legtöbb elérhető anyag ebben a hullámhossztartományban már erősen abszorbeálja a sugárzást, diszperziója pedig kicsi. Spektrális bontóelemként a kísérletezők káliumklorid- (Sylvin), kalciumfluorid- (folyópát) vagy kősóprizmát használtak. Ezek értékes, nem kurrens eszközök voltak, és a cikkekben többször is szerepel köszönet a kölcsönadónak, készítőnek. A nagyobb diszperziójú kősó erős higroszkóposága miatt csak kivételesen került felhasználásra.

A kísérletezők – a prizma anyagát kivéve – nem közölték az optikai rész leírását, de azért, hogy a következő tárgyalás egyértelmű legyen, az optikának a 4. ábrán szereplő egyszerűsített sémáját használom. Nem tükrös monokromátort mutatok be, hanem lencsését, mert a bonyolult fényutak követése elvonná az olvasó figyelmét. A lényeg ugyanaz marad. A sugárzás az FT feketetest nyílásán keresztül a D_1 diafragmára vagy résre esik, a továbbiakban ez a belépő diafragma. (Belépő diafragmaként nem lehetett közvetlenül az üreg falán levő lyukat használni, mert a külső fal is sugárzott.) A diafragma mérete a (7) kifejezésben szereplő ΔF . A diafragmáról a fény $\Delta \Omega$ térszögben az L_1 lencsére jut el, majd a közel párhuzamos nyaláb a P prizmára esik. A megfelelő hullámhossz kiválasztása végett a prizmat a papír síkjára merőleges tengely körül forgatni lehet. Az L_2 lencse pedig az eltérített

nyalábot a D_2 detektorra gyűjti össze, ami most a kilépő diafragma. Az optikai rendszer, mint geometriai optikai eszköz, a belépő diafragmát a detektor síkjába képezi le. A detektor felületének célszerűen meg kell egyeznie a belépő D_1 diafragma képével. Ha nem, akkor a kettő közül a kisebbik a meghatározó.

Döntő jelentőségű, hogy mekkorára választhatjuk a belépő diafragma ΔF felületét, mert ezzel is arányos a mért teljesítmény. Mivel mindig van hátér is, a teljesítménynek ezt felül kell múlnia. Nagy ΔF mellett alacsonyabb feketetest-hőmérséklet mellett is mérhetünk. Viszont ΔF azért nem lehet tetszőleges, mert a feketetest nyílásának jóval kisebbnek kell lennie az üreg felületénél. Azért sem lehet nagy, mert a monokromátor kilépő nyílása a belépő képe, és kicsinek kell lennie, hogy megfelelő legyen a hullámhossz felbontása. Végül a $\Delta\Omega$ térszög sem lehet nagy, mert a geometriai optika (az adott esetben a párhuzamosítás és a leképezés) törvényei csak kis térszögekre teljesülnek. Nem is érdemes a homorú tükrök felületét nagyobbra választani, mint a prizma belépő felülete. A prizma tipikus felülete $3 \times 3 \text{ cm}^2$, a tükrök gyújtótávolsága 30 cm volt.

Ezek után mekkora lehetett a belépő/kilépő rés szélessége? A prizma a kilépő síkra kivetíti a spektrumot, a prizma forgatásával ez seper végig a detektoron. Legyen a prizma 60 fokos és a sugármenet a prizma két oldalán közel szimmetrikus (ez az optimális eset)! Az a spektrum, amelyet a monokromátorral felbontottak az ($1 \mu\text{m} - 8 \mu\text{m}$) tartományba esett. A gyakran használt KF_2 kristály törésmutatójának hullámhosszfüggése ismeretében (1,42888, illetve 1,34983 a két határon) kiszámítható, hogy a prizmát 0,055 radiánnal kell a két határ között elfordítani. Ha 30 helyen kívánjuk az intenzitást megmérni, akkor körülbelül 2 milliradiánnal kell a prizmát lépésenként elfordítani. A tükrök tipikus gyújtótávolsága 300 mm volt, ez a szög megfelel 0,6 mm széles résnek, detektornak. *Kéretik ezt az adatot is megjegyezni!*

A mért $J(\lambda, T)$ teljesítményt befolyásolja a monokromátor és a detektor is. Ezért

$$J(\lambda, T) = a(\lambda) b(\lambda) I(\lambda, T), \quad (8)$$

ahol $a(\lambda)$ a monokromátor átvitelét, $b(\lambda)$ a detektor érzékenységét jelöli, mindkettő hullámhosszfüggő lehet. A monokromátor $a(\lambda)$ átvitele elsősorban azért függ a hullámhossztól, mert egyrészt a prizma anyaga is abszorbeál, másrészt a felületek reflexiója is függ a beesés szögétől, a prizma anyagától.

A detektor

Foglalkozzunk a (8) egyenlet bal oldalával is! Fényteljesítményt kell mérni, de ez nagyon kicsi a szokásos teljesítményekhez képest. (Gondoljunk az 1 milliwattos lézerre, milyen intenzív.) Bolométert használtak, egy fekete anyaggal bevont fémszalagot, amely a sugárzás hatására felmelegszik, és ezért ellenállása megváltozik. A mérendő energia kicsi, te-

hát a szalag tömegének is annak kell lennie, ezért a platinaszalag vastagságát 1 mikron körülire választották és az ellenállás változását hídban mérték. Azt is fel kell tenni, hogy a bevonat tényleg fekete vagy szürke, $b(\lambda) = 1$ vagy legalább közel van ehhez az értékhez, és állandó. Máskor a bolométer termoelem volt, amire ugyanez áll.

A spektrum *látható tartományában* nem is kell az intenzitást bolométerrel mérni, dolgunkat megkönnyíti a fotometria, a fényérés. Itt kihasználjuk, hogy a szem eleve nagyon érzékeny a fényteljesítményre, emellett még igen jól meg tudja állapítani, hogy két azonos színű folt megvilágítása egyenlő-e. Mérésnél a mérendő nyalábot és egy stabilan sugárzó lámpa nyalábját egymás mellé vetítjük, az utóbbi intenzitását addig változtatjuk, amíg az egyenlőség nem teljesül. A változtatást adott esetben polarizátorok segítségével érték el: a lámpa fényét előbb polarizálták és egy következő polarizátort forgattak, ehhez csak egy gomb szögállítását kellett leolvasni. A fotometriks mérés relatív pontossága jobb, mint az energiamérőé. *Hátránya*, hogy csak a látható tartományban használható.

Miután tudjuk, mit és hogyan mérünk, felmerül a kérdés: a hullámhossz és a hőmérséklet közül melyiket célszerű paraméterként fixen tartani, és fix érték mellett a másikat változtatni? A paraméter értékét változtatva egy görbesereget vehetünk fel. Izotermákat vagy izokromátákat mérjünk?

1. Az első pillanatban az *izotermákat* választanánk, mert hőmérsékletet csak lassan lehet változtatni, a mérési idő hosszú, és ilyenkor szinte mindig közbejöhethet valami, újra kell a méréssorozatot kezdeni, a hullámhosszat pedig monokromátorunkkal csupán egy csavar forgatásával folytonosan változtathatjuk.

2. Ha az *izokromátákat* választjuk, a hőmérséklet-változtatás lassúságával kapcsolatos nehézség ugyan fennáll, de fix hullámhosszon, hőmérséklet-változtatással végzett mérésnél a (8) egyenlet jobb oldalán szereplő, $a(\lambda)$, $b(\lambda)$ mennyiségek, valamint a $\Delta\lambda$ sáv szélesség nem változnak, a keresett $I(\lambda, T)$ görbe alakja meghatározható, mint a hőmérséklet függvénye. Ha monokromátorunk beállítása stabil, a hullámhosszak jól reprodukálhatók, akkor mérhetünk állandó hőmérséklet mellett is, az adatokat viszont állandó hullámhossz mentén csoportosítjuk. A kísérletezők ezt nem írták meg, de egyes mérési grafikonokból arra lehet következtetni, hogy így tettek.

A döntő kísérletekben a fix hullámhosszat, az izokromáták módszerét használták.

Irodalom

1. F. Hund: *Einführung in die theoretische Physik*. T.4, Bibliographisches Institut VEB Leipzig, 1950.
2. W. Wien: Ueber die Energievertheilung im Emmissionsspectrum eines Schwarzen Körpers. *Annalen der Physik* 58 (1896) 663.
3. W. Wien, O. Lummer: Methode zur Prüfung des Strahlungsgesetzes schwarzer Körper. *Annalen der Physik* 56 (1895) 451.
4. F. Paschen: Ueber die Vertheilung der Energie in Spectrum des schwarzen Körpers bei höheren Temperaturen. Sitzungsberichte der Preussischen Akademie zu Berlin, 1899, 859 old.
5. F. Paschen: Ueber Gesetzmässigkeiten in den Spektren fester Körper. *Annalen der Physik* 60 (1897) 662.