

A PLANCK-FÉLE ÁLLANDÓ MÉRÉSÉNEK JELENTŐSÉGE ÉS LEHETŐSÉGE A HALLGATÓI GYAKORLATOKON

Írta: HALÁSZ TIBOR és KOVÁCS LÁSZLÓ

A való világ megismerése eszmélkedő gyermekkorunktól kezdve sokáig, még a természettudományok tanulásának kezdetén is, közvetlenül kötődött érzékszerveinkhez. A konkrét benyomások öntudatlan megszokása, a láthatóhoz és a megfoghatóhoz rögződő gondolatok egyaránt alapját képezhetik a szűk, abszolutizált, rosszul értelmezett szenzualizmusnak. Ez is oka annak, hogy a mikrovilág, amely már nem ismerhető meg csak az érzékszerveinkkel, sokszor misztikussá, megfoghatatlanná válik tanítványaink előtt.

Ne csodálkozzunk ezen, hiszen a nagytudású fizikusok közül sokan „eltűnt anyagról”, a „matematikai formula elsődlegességéről”, „a megsemmisített materializmusról” beszéltek és beszélnek még ma is. Fontos feladat tehát hallgatóinkban olyan természettudományos szemléletmód kialakítása, amellyel a fizika modern eredményeit előítéletek nélkül magukévá tudják majd tenni. Szükséges ez a szemléletmód a fizikai idealizmus veszélyeinek elkerülése érdekében is.

A kérdés megoldásához járható utat a dialektikus materialista ismeretelmélet tudatos alkalmazása biztosít. Ezt erősíti az a személyes élmény, amelyet a mikrovilággal kapcsolatos méréseink elvégzése jelenthet.

A h hatáskvantum, amely az abszolút fekete test sugárzási törvényének megfogalmazásakor vált ismertté, egyike a legtöbb gondot okozó fizikai állandóknak. Ugyanakkor nagyon rövid idő alatt az is kiderült róla, hogy a mikroobjektumok mozgástörvényeinek kifejezéseiben szereplő nagyfontosságú univerzális természeti állandó.

h -val kapcsolatos a mikroobjektumok közötti energiacsere kvantumossá jelleget értelmézés. Másrészt, mivel a klasszikus mechanikában az alapmennyiségek egységeit önkényesen, egymástól függetlenül választották meg, és a kvantumfizika ezt átvette, ezért a PLANCK-állandó a kvantumfizika minden egyenletében szerepel. Továbbá meghatározó szerepet játszik a klasszikus fizika alkalmazhatósági területeinek kijelölésében. Olyan — sok vitát kiváltó — összefüggésben is szerepel, mint a HEISENBERG-féle határozatlansági reláció.

A fotonok és mikrorészecskék kettős tulajdonsággal rendelkeznek. A hullámtulajdonságok — ν frekvencia és λ hullámhossz — valamint a korpuszkuláris tulajdonságok — a részecske E energiája és p impulzusa — között mennyiségi kapcsolat van:

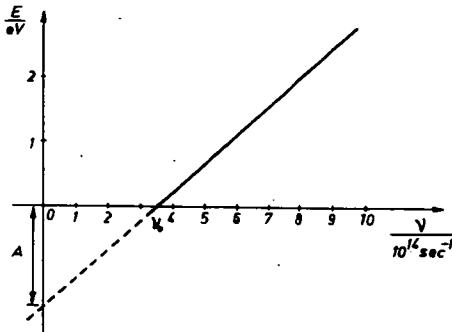
$$E = h\nu, \quad \lambda = \frac{h}{p}$$

Ezeknek az elméleti formuláknak és más kísérletileg mérhető adatoknak a segítségével h értéke meghatározható.

A Planck-féle állandó mérésének valamilyen módja — legtöbbször fotocellá-

ban létrehozott ellenfeszültségek módszere — szinte valamennyi felsőoktatási intézmény fizika gyakorlatának anyaga. Amiért szót érdemel ez a téma, az, hogy a mérés pontossága majdnem mindenütt úgynevezett félnagyságrend méretű, tehát 50% körüli hibát is feltételez. A mérés menete pedig a sok segédeszköz miatt nehezen áttekinthető, bonyolult [3].

A fent leírtak ismeretében tettünk kísérletet egy sokkal pontosabb és áttekinthetőbb, tehát a hallgatók számára elfogadható módszer és eszköz megteremtésére. Gondolatunk lényegében a PLANCK-állandó fotocellával történő szokásos mérésének jelentős mértékű finomításán, a korszerű félvezető technikán és az integrált áramkörök adta lehetőségek felhasználásán alapul.



1. ábra

A külső fényelektromos jelenség legfontosabb törvényszerűségei a következők:

- A fotoáram erőssége szigorúan arányos a fotoeffektust kiváltó fénycsugár erősségével.
- A fotoelektronok kinetikus energiája független a fény intenzitásától. Egy adott fotókatódból kilépő elektronok maximális energiája csak a kiváltó fény ν frekvenciájától függ, mégpedig lineárisan (1. ábra)

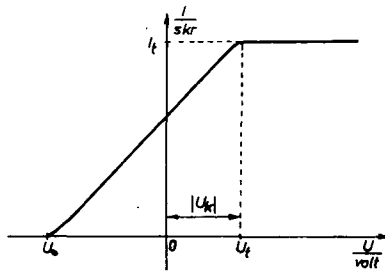
$$\frac{1}{2} m v_m^2 = h\nu - A.$$

- Minden fotókatód esetében létezik a fotoelektronokat kiváltó fény spektrumtartományának olyan λ_0 hosszuhullámú határa, amelytől kezdve fotoelektronok nem lépnek ki a katódból. Ekkor $h\nu_0 = A$.
- A fotoeffektus pillanatszerű, tehetetlenség nélküli jelenség, tehát a megvilágítással együtt lép fel és együtt szűnik meg [4].

Amennyiben a foton $h\nu$ energiája elegendő ahhoz, hogy a katódból a visszatartó erők ellenére kiszabadítson egy elektront, akkor azonnal létrejön a fotoeffektus. Ha $h\nu$ nagyobb az A kilépési munkánál, a többlet energia a kilépett elektron kinetikus energiájaként jelentkezik. A jelenség pillanatnyi volta miatt elhanyagolható a valószínűsége annak, hogy az elektron egynél több foton energiáját vegye fel.

A jelenség viszonylag zavartalan vizsgálatához speciális — a köznapi gyakorlatban használt fotocellától jelentősen eltérő — úgynevezett LÉNÁRD-féle gömbfotocella szükséges. Ennél a fotocellánál vákuumban helyeznek el egy pontszerű katódot, és ezt gömb alakú anóddal veszik körül. Így elvileg elérhető, hogy amennyiben nincs ellenfeszültség a katód és az anód között, minden kilépő elektron eljusson

az anódra. Legtöbbször azonban — mivel a katód és az anód anyaga különböző — néhány voltos kontakt potenciál (*Volta*-potenciál) lép fel ellenfeszültségként. (A fotokatódnak jól megfelelő anyagok előbb állnak a feszültségi sorban [2].) Gondosan kell ügyelni arra, hogy fény csak a pontszerű fotokatódot érje, mert ellenkező esetben az anódról is lépnek ki fotoelektronok. Változtatva az anódra és a katódra kívülről rávitt feszültséget a 2. ábrán látható görbét kapjuk, ahol U_0 az a kívülről



2. ábra

a katód és az anód közé kapcsolt feszültség, ahonnan kezdve megindul a fotoáram; az I_t telítési áram az U_t feszültségnél kezdődik. A fotoelektronok különböző sebességűek, mert a katód anyagából különböző mélységből indulnak, ezért változik az ellenfeszültséggel arányosan az $U_0 - U_t$ intervallumon belül a fotoáram. A telítési áram nem az $U_t = 0$ feszültséghez tartozik, hanem a kontakt potenciál miatt eltolódik, tehát $U_t = -U_k$.

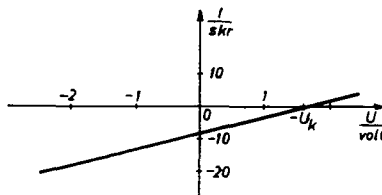
A fotoelektronok maximális sebességét ellentér módszerrel, fotocella alkalmazásával meghatározhatjuk

$$\frac{1}{2} m v_m^2 = e U_z,$$

ahol $U_z = U_0 + U_k$, tehát az a feszültség, amelynek valóban fel kell lépni a katód és anód között, hogy a fotoáram éppen megszűnjön.

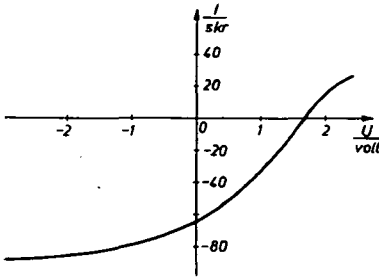
A gyakorlatokon általában nem áll rendelkezésünkre speciális, radiális terű fotocella. Így a méréseket a kereskedelemben kapható fotocellával kell elvégeznünk. Az általunk használt vákuumcellánál a katód nagy kiterjedésű, az üvegballonra föl vitt ún. réteg-katód, amely főként káliumot tartalmaz. Az anód kétkivezetésű platina hurok.

A gyakorlat elvégzésekor mért áramerősségek három részből tevődnek össze:
 a) A sötétáramból, amely a mi esetünkben 10^{-13} A nagyságrendű volt (3. ábra). Akkor is folyik áram, ha fény nem éri a fotocellát, a nem tökéletes szigetelés és termikus elektronemisszió miatt [5].

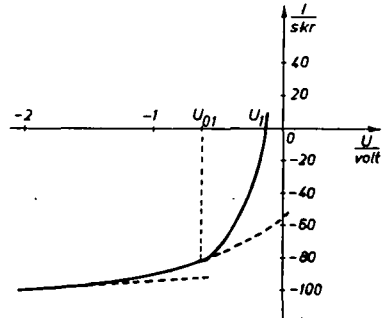


3. ábra

- b) Az „ellenfotocella” áramából, mert az eredeti fotocella katódjából a termikus emisszió hatására kivált kálium atomok lecsapódnak a platina hurokra és ha ezt fény éri, ebből is lépnek ki elektronok. Az eredeti fotocellára kapcsolt ellenfeszültség pedig ezeket a kálium elektróda felé mozgatja. Az így létrejött áram a mi méréseinknél 10^{-12} A nagyságrendűnek adódott (4. ábra).
- c) A vizsgálandó fotoáramból, ez a harmadik és legjelentősebb összetevő, amely a 2. ábrának megfelelően változik.



4. ábra



5. ábra

Az 5. ábrán látható az a görbe, amely az egyidőben jelentkező háromféle áram eredője, ha egy adott $\nu > \nu_0$ frekvenciájú fénnel úgy világítottuk meg a katódot, hogy direkt fény az anódot nem érte.

Feladatunk elvégzésekor ugyanis különböző frekvenciájú monokromatikus fényt használtunk. Megfelelően változtatva az ellenfeszültséget, és leolvassa a hozzátartozó fotoáramokat, felrajzolhatjuk a feszültség-fotoáram görbét. Ennek segítségével megállapítható az az U_{01} feszültségérték, amely fölött megindul a fotoáram. Bármely két ismert frekvenciájú fény használatánál az összetartozó ν és U_0 értékpár segítségével, a kilépési munka és a kontaktpotenciál ismerete nélkül is meghatározható a PLANCK-féle állandó.

$$\frac{1}{2} m v_{m1}^2 = e U_{z1} = e U_{o1} + e U_k = h \nu_1 - A,$$

$$\frac{1}{2} m v_{m2}^2 = e U_{z2} = e U_{o2} + e U_k = h \nu_2 - A,$$

ahol U_{o1} , U_{o2} a kontaktpotenciállal együtt a v_{m1} , v_{m2} legnagyobb sebességű elektronok lefékezésére szükséges feszültség. Ezekből h kifejezhető:

$$h = \frac{e(U_{o1} - U_{o2})}{\nu_1 - \nu_2}.$$

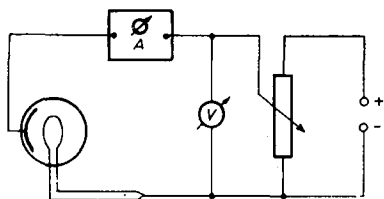
A mérés pontosságát erősen befolyásolja az U_0 feszültség meghatározásának pontossága. Két, egyirányban hajló görbe szétválási pontját kell megállapítani, és ez néhány tized volt eltérést is eredményezhet. Növeli a hibát még a különböző nagyságú áramok miatt a mérőműszeren létrejött különböző feszültségesés is. Célszerű, ha elvileg indokolatlan is, a görbe és a feszültségtengely jól meghatározható metszéspontjához tartozó feszültségekkel számolni (U_1 , U_2). Ezek az értékek a különbségi módszernél felhasználhatók, hiszen közel párhuzamos eltolódással

jöttek létre és $I=0$ miatt a mérőműszeren nincs feszültségesés. Jelentkezik a fotocella frekvenciaérzékenységből adódó hiba, amely azonban az általunk használt intervallumon belül kisebb eltérést okozott, mint az elvileg korrekt módon meghatározott értékek pontatlansága [6].

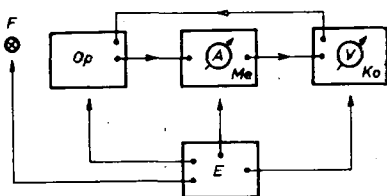
Grafikon segítségével is meghatározható a h értéke, mert ha az eU_{z1}, eU_{z2} energiák helyett az eU_{o1}, eU_{o2} energiaértékeket rajzoljuk fel a frekvencia függvényében, az 1. ábrának megfelelően ugyancsak egyenest kapunk, csak az eredetivel párhuzamosan, eU_k értékkel eltolva. Az irántangense természetesen ennek is h lesz, de nem a ν_0 frekvenciánál és az A kilépési munkának megfelelő pontban metszi a tengelyeket. Mindez megtehető U_1, U_2 feszültségértékekkel is, de ez további eltolást eredményez.

A mérés céljára szolgáló készüléket tanszékünkön készítettük el.* Az volt a célunk ezzel a „háziilag” készített eszközzel, hogy lehetőleg a hazai kereskedelemben kapható alkatrészekből épüljön fel, a mérési gyakorlat által megszabott követelményeknek és a szokásos pontosságnak megfelelően.

A PLANCK-féle állandó meghatározásánál a legnehezebb feladat ahogy a hallgatók laboratóriumi gyakorlatánál szokásos 5%-os pontosságot elérjük. Ennek alapfeltétele volt az, hogy a kompenzáló feszültséget 10–20 mV pontossággal beállíthassuk és mérhessük, valamint az, hogy az áramkörben folyó 10^{-13} A nagyságrendű áramot nagy biztonsággal és stabilitással meghatározhassuk [1].



6. ábra



7. ábra

A mérőberendezés elvi felépítését a 6. ábra szemlélteti. A készülék leglényegesebb része egy olyan nagy bemeneti ellenállású voltmérő, amely 10^{-13} A nagyságrendű áram esetén is méri a feszültségesést, illetve a különböző kompenzációs feszültségek esetén a körben folyó áramot.

A megépített berendezés bloksémája a 7. ábrán látható, és a következő egységekből tevődik össze:

- a) F fényforrás,
- b) Op optikai egység,
- c) Me egyenáramú mérőerősítő,
- d) Ko kompenzáló egység,
- e) E energia ellátó rendszer.

F fényforrásként a kereskedelemben kapható Hgl S 125 típusú higanylámpát alkalmaztunk, melynek a külső üvegburáját eltávolítottuk. Így ez a fényforrás a higanygőz gerjesztett állapotára jellemző hullámhosszúságú fényt bocsát ki; pl. a látható tartományban 365; 404,7; 435,8; 546; 579; 615,2 nm hullámhosszúságú fényt.

* Itt mondunk köszönetet Halász Mihály tanszéki technikusnak az eszköz készítéséért.

Az *Op* optikai egység a fényforrás által kibocsátott fényt optikai lencsék segítségével egy Pressler gyártmányú 451/GKV típusú kálium katódú vákuum fotocellára vetíti. A leképezésnél ügyeltünk arra, hogy a fotocella katódjára jutó kör alakú fényfolt lehetőleg éles határú legyen, és a hurok alakú platina anódra ne essék. A fénysugár útjába három 365, 405 és 546 nm-es hullámhosszúságú interferencia szűrő helyezhető el. Ezek a 28 mm átmérőjű interferencia szűrők a készülék dobozán kívülről válthatók egy tolószerkezet segítségével. Az optikai egység egy olyan fémháza került, melyet a külső zavaró fénytől gondosan elszigeteltünk, és a belső szóródó fény zavaró hatásának csökkentésére belülről feketére festettük.

Az *Me* mérőerősítő lényegében egy 3 Gohm bemeneti ellenállású csővoltmérő, amelyet két db SM 104 típusú térvezérlésű tranzisztorból és egy SN 72709 N típusú

1. táblázat

U volt	I skr		
	1-es szűrő 546 nm	2-es szűrő 405 nm	3-as szűrő 365 nm
-2,5	-83	-98	-98
-2,4	-82	-98	-96
-2,3	-81	-98	-95
-2,2	-80	-97	-94
-2,1	-80	-97	-91
-2,0	-80	-96	-89
-1,95			-86
-1,9	-80	-96	-84
-1,85			-80
-1,8	-79	-95	-77
-1,75			-71
-1,7	-78	-93	-65
-1,65			-56
-1,6	-78	-90	-47
-1,55		-88	-33
-1,5	-78	-85	-15
-1,45		-82	+ 4
-1,4	-77	-78	+27
-1,35		-71	+52
-1,3	-77	-62	+69
-1,25		-47	
-1,2	-76	-33	
-1,15		-12	
-1,1	-75	+11	
-1,05		+34	
-1,0	-74	+52	
-0,9	-73		
-0,8	-72		
-0,75	-70		
-0,7	-68		
-0,65	-65		
-0,6	-62		
-0,55	-56		
-0,5	-49		
-0,45	-37		
-0,4	-19		
-0,35	+ 7		
-0,3	+38		

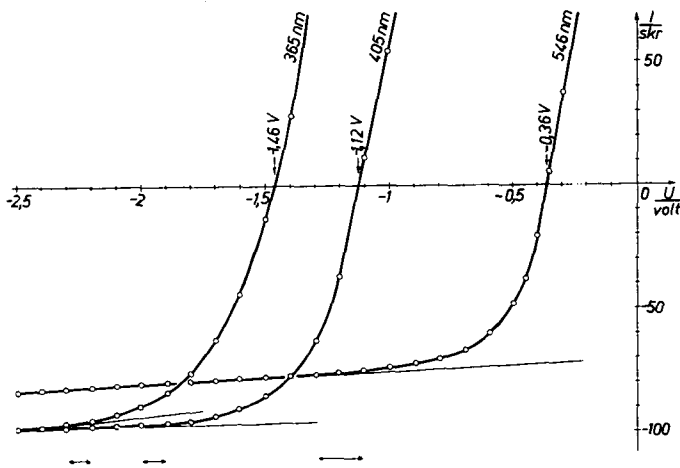
integrált áramkörből építettünk fel. A mérőerősítő kimenetén egy $100 \mu\text{A}$ -es, 2 Kohm-os forgótekerces mutatót műszert helyeztünk el. A műszer mutatójának végkitérést a bemeneten átfolyó 10^{-11} A-es áram hozza létre, így érzékenysége 10^{-13} A/skr. A mérőerősítő erősítése folyamatosan szabályozható 10^{-12} – 10^{-13} A/skr intervallumban a különböző hullámhosszúságú fény intenzitásának megfelelően. Az erősítő nullponteltolódását a két térvezérlésű tranzisztor hőkompenzációjával sikerült minimumra csökkenteni és így egy órai használat alatt ez kisebb, mint 1%.

A *Ko*-val biztosított kompenzáló feszültség 0-tól 3 V-ig szabályozható és forgótekerces mutató mérőműszerrel mérhető egyenfeszültség. Az egyenfeszültség hullámossága jobb, mint 0,1%. A 3 V-os forgótekerces műszer legkisebb skálaosztása 0,05 V. Így az 0,01–0,02 V még jól becsülhető.

Az *E* energia ellátó egység biztosítja az *Me* mérőerősítő részére a 2×15 V stabilizált egyenfeszültséget, a *Ko* kompenzáló egység részére a 3 V egyenfeszültséget, a jelzőlámpa számára 6,3 V váltakozó feszültséget, az *F* fényforrás üzemeltetéséhez szükséges váltakozó feszültséget, valamint a fotocella anódjának időnkénti kiizzításához szükséges 1 A-es egyenáramot.

A felsorolt egységeket egy fémdobozba építettük be úgy, hogy a szabályozó gombok, a feszültség és árammérő műszerek a doboz előlapján vannak. A dobozban külön zárt részt alakítottunk ki a fényforrás, az áramkorlátozó tekerces és a hűtő ventilátor részére. Az elektromos szerelést nyomtatott áramköri lapokkal oldottuk meg. Az elektromos áramköröknél különös gondot fordítottunk a megfelelő egységek elektromos árnyékolására, főleg a fotocella vezetékének, de különösen a térvezérlésű tranzisztorok bemeneti vezetékének esetében.

Így értük el a kitűzött célunk megvalósítását, amelynek szemléltetésére legalkalmasabbnak egy mérési sorozat közlését és kiértékelését tartjuk (1. táblázat).



8. ábra

A 8. ábrán látható görbék és a feszültségtengely metszéspontjaiként nagy biztonsággal leolvashatók az $U_1 = -0,36$ volt; $U_2 = -1,12$ volt; $U_3 = -1,46$ volt feszültségértékek. Ezek közül bármelyik kettő felhasználásával kiszámítható a h :

$$h_{2,1} = 6,34 \cdot 10^{-34} \text{ joule sec}$$

$$h_{3,2} = 6,7 \cdot 10^{-34} \text{ joule sec}$$

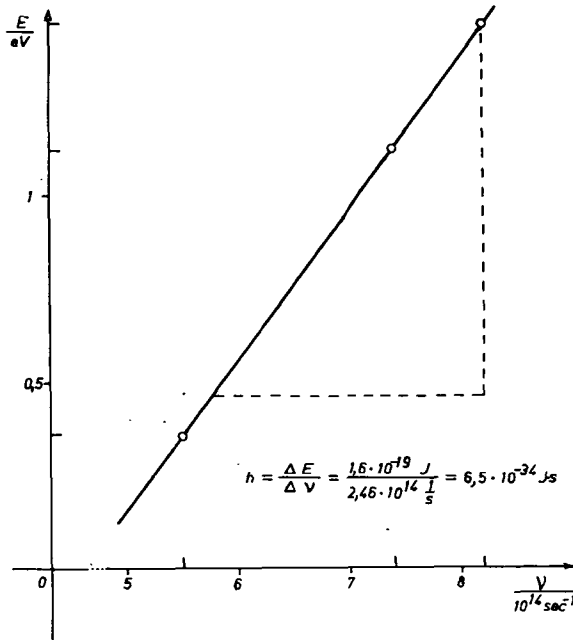
$$h_{3,1} = 6,45 \cdot 10^{-34} \text{ joule sec}$$

$$h_{\text{átlag}} = 6,5 \cdot 10^{-34} \text{ joule sec} \pm 3,08 \%$$

Az irodalmi értéktől 1,81%-kal tér el ez az átlag. Így tehát a mérés minden szempontból pontosabb a célul kitűzött 5%-nál.

U_{01} ; U_{02} ; U_{03} meghatározása a grafikonról jól látható, hogy csak 0,1–0,2 voltos intervallum valamelyik pontjaként lehetséges. Szélső eseteket figyelembe véve a h értéke legrosszabb esetben 36%-os, legjobb esetben 14%-os hibával határozható csak meg.

Grafikus módszerrel is $6,5 \cdot 10^{-34}$ joule sec értéket kapunk, ha eU_1 ; eU_2 és eU_3 értékeket a v függvényében ábrázoljuk (9. ábra).



9. ábra

Összefoglalás

A PLANCK-féle állandó mérése hallgatók laboratóriumi gyakorlatán szakmai, szemléletbeli és világnézeti jelentőségű feladat. Kellő hatást csak akkor érhet el mind a három területen, ha a mérés áttekinthető, megbízható és 5%-osnál kisebb a hibája. Ezt azért tettük el, hogy készítettünk egy 10^{-13} A-es érzékenyséű egyenáramú mérőerősítőt, amelynek segítségével az ellentér módszert a szokásosnál nagyobb pontosságú vizsgálatnak vetettük alá. Az általunk ismertett módon hallgatóink — 2 órás gyakorlaton — 1–3%-os hibával határozzák meg a h értékét.

IRODALOM

- [1] BOR P., HALÁSZ T., KOVÁCS L.: Fizikai gyakorlatok, II. kötet. Tankönyvkiadó, 1972.
- [2] BUDÓ Á.: Kísérleti Fizika, II. kötet. Tankönyvkiadó, 1968.
- [3] BUDÓ Á., SZALAY L.: Fizikai laboratóriumi gyakorlatok. Tankönyvkiadó, 1965.
- [4] KÖVESDI P.: Fizika VI. rész (Atomfizika). Tankönyvkiadó, 1963.
- [5] MÁTRAI T.: Gyakorlati spektroszkópia. Tankönyvkiadó, 1963.
- [6] SIMONYI K.: Elektronfizika. Tankönyvkiadó, 1965.

ЗНАЧЕНИЕ И ВОЗМОЖНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ПОСТОЯННОЙ ПЛАНКА НА ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЯХ СТУДЕНТОВ

Т. Халас и Л. Ковач

Работа подчёркивает профессиональное, мировоззренческое, концепционное значение измерения постоянной Планка на практических занятиях студентов.

Представляется метод, при помощи которого студенты могут измерить ценность h с более 5% точностью на двухчасовых лабораторных занятиях.

В дальнейшем необходимый к измерению прибор представляет, сконструированный в институте, с которым метод противоположных полей, используемый в фотоэлементе, при помощи прямого измерительного усилителя чувствительностью 10^{-13} подвергли исследованию с точностью большей чем обычно.

В работе находится ряд измерений, служивший определению h и его оценке.

DIE BEDEUTUNG UND MÖGLICHKEIT DER MESSUNG DER PLANCK'SCHEN KONSTANTE BEI DEN STUDENTEN—ÜBUNGEN

T. Halász und L. Kovács

Die Studie betont die fachliche, Weltanschauungs- und intuitive Bedeutung der Messung der PLANCK'schen Konstante anlässlich der praktischen Übungen der Studenten.

Sie gibt eine Methode bekannt, mit Hilfereder die Hörer bei ihren Laboratoriumsübungen h -Werte mit einer über 5-prozentigen Genauigkeit zu messen vermögen.

Geschildert wird das zur Messung benötigte — im Institut angefertigte — Gerät, mit dem die bei der Photozelle angewandte Gegenfeld — Methode unter Benutzung eines Gleichstrom-Verstärkers von 10^{-13} A Empfindlichkeit einer grösseren Genauigkeitsprüfung als gewöhnlich unterworfen wurde.

Die Studie enthält die zur Bestimmung von h dienende Messreihe und deren Bewertung.