

MODERN FIZIKA LABORATÓRIUM

19. MÉRÉS

Elektron fajlagos töltése

Mérést végezte:

ASZTALOS BOGDÁN TIMÓT

KOVÁCS KRISTÓF PÉTER

PÁLFI MÁRIA

(FIZIKA BSC)

Mérés időpontja:

2018.04.23.

hétfő délután

1. Elméleti bevezető

Az elektron a legkorábban felfedezett elemi részecske, felfedezése a katódsugárcsövekkel végzett kísérletekhez köthető, amik már a XIX. század végén megjelentek. Fajlagos töltését először J. J. Thomson mérte meg 1897-ben, pontosan a töltését (és ezáltal közvetve a tömegét) pedig Robert Millikan 1909-ben. Mérésünk során a Thomson-féle kísérletet végezzük el, amiből az elektron fajlagos töltését akarjuk megkapni.

A kísérlet során egy katódsugárcsövet mágneses térbe téve vizsgáljuk a sugár pályájának eltérülését. B mágneses térben v sebességgel mozgó, e töltéssel rendelkező részecskére $F_L = Bev$ nagyságú erő hat a sebesség irányára merőlegesen, így homogén mágneses térben a részecske körpályára kényszerül. A körpályán tartó centripetális erőt a Lorentz-erő fedezi, így felírható az alábbi egyenlet:

$$m \frac{v^2}{r} = Bev \quad \text{amiből a sebesség:} \quad v = \frac{Ber}{m} \quad (1.1)$$

Az elektronokat U gyorsítófeszültséggel gyorsítjuk fel, így az energiamegmaradás miatt:

$$\frac{1}{2}mv^2 = Ue \quad (1.2)$$

Ebbe az összefüggésbe beírva az (1.1) egyenletből kapott kifejezést v -re, az alábbi összefüggést kapjuk a részecske fajlagos töltésére:

$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{(rB)^2} \quad (1.3)$$

A mérés során a gyorsítófeszültség és az általunk létrehozott homogén mágneses tér függvényében fogjuk mérni az elektronsugár pályájának sugarát, amiből következtethetünk majd a fajlagos töltés értékére.

2. Mérés összeállítása és menete

A mérés fő része a katódsugárcső, amit Helmholtz-tekercek vesznek körül. A katódsugárcsőben egy izzókatódról termikus elektronemisszióval gerjesztett elektronokat gyorsítunk, amik a kis nyomású vízgőzben a vízmolekula hidrogénatomjaival ütközve halványlila fényt bocsátanak ki, és így tudjuk megfigyelni az elektronok pályáját. A katódsugárcső két odalán két tekercs van, amik viszonylag nagy homogenitású mágneses teret hoznak létre a katódsugárcsőön belül. A mágneses tér nagysága: $B = \left(\frac{8}{5\sqrt{5}}\right) \frac{\mu_0 n I}{R}$ ahol n a tekercsek menetszám, I a bennük folyó áram, R pedig a tekercsek sugara.

Bár a létrejövő létrejövő áram és mágneses tér közötti összefüggést a fenti formula megadja, a mérést túl sok minden befolyásolja ahhoz, hogy erre hagyatkozzunk, ezért a kialakult mágneses tér függését az áramtól először egy Hall-szondával hitelesítjük. A Hall-szondát mágneses térbe téve, rajta feszültség mérhető, aminek értéke arányos a mágneses tér nagyságával, ahol az arányossági tényező ismert. A Helmholtz-tekerceket úgy kalibráljuk, hogy a Hall-szondával kimérjük, hogy különböző áramok hatására milyen mágneses tér alakul ki.

A másik mennyiség, amit a mérés során mérnünk kell, az az elektronok pályájának a sugara. Mivel a katódsugárcső egy lezárt üvegbúra, a sugarát nem lehet közvetlenül megmérni, de a cső mellé tett tükrös vonalzon átnézve, leolvashatjuk a pálya átmérőjét (ami a sugár kétszerese).

3. Mérési adatok

3.1. Helmholtz-tekercek kallibrálása

A Hall szondát Helmholtz-tekercek közé helyezve, és azok áramát változtatva az 3.1. táblázatban szereplő adatokat kapjuk. A pontokat ábrázolva látható, hogy magasabb áramerősség mellett nagyobb a mérőeszköz pontatlansága.

A feszültségből a

$$B = \alpha U_H \quad \alpha = 8,5 \cdot 10^{-2} \frac{T}{V} \quad (3.1)$$

összefüggés alapján számolhatjuk ki a térerősséget. Ezt az áramerősség függvényében ábrázoltuk. A pontokra egyenest illesztve megkaphatjuk az áram- és térerősség közti lineáris összefüggést (3.1. ábra).

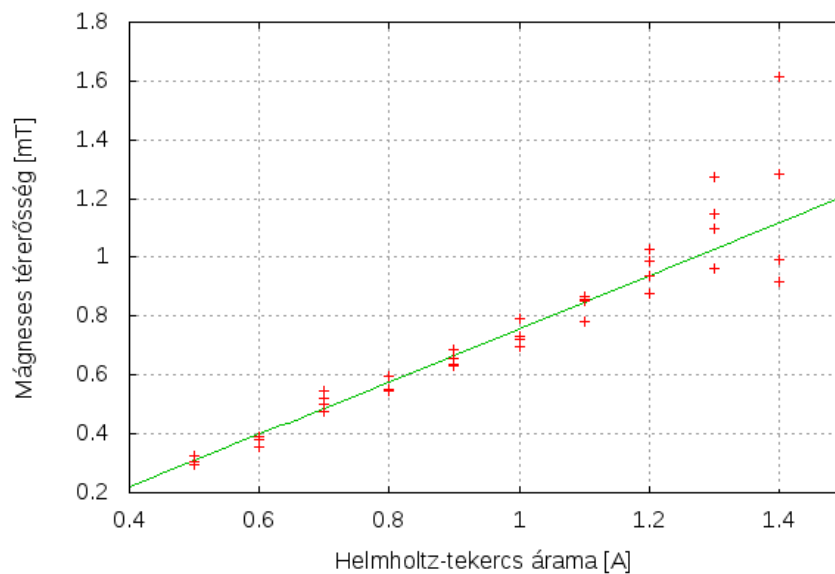
Az illesztett egyenes egyenlete:

$$B = 0.90I - 0.14 \quad (3.2)$$

Így a $B = kI$ összefüggésben $k = (0.90 \pm 0.051) \frac{\text{kg}}{\text{s}^2 \cdot \text{A}^2}$, ahol k hibája az illesztés pontatlanságából származik.

Helmh. tekercs árama (A)	Hall-feszültség (mV)			
	1.mérés	2.mérés	3.mérés	reprodukált mérés
0.5	3.6	3.5	3.8	3.5
0.6	4.6	4.2	4.5	4.5
0.7	6.1	6.4	5.9	5.6
0.8	6.5	6.4	7.0	6.5
0.9	8.1	7.5	7.7	7.4
1.0	8.5	8.6	9.3	8.2
1.1	10.2	10.1	10.0	9.2
1.2	12.1	11.6	11.0	10.3
1.3	15.0	12.9	13.5	11.3
1.4	10.8	19.0	15.1	11.7

3.1. táblázat. A Helmholtz-tekercsben Hall-szondával mért térerősség különböző szondán folyó áramerősségek szerint.



3.1. ábra. A tekercsben folyó áram, a köztük lévő térben kialakult térerősség és a mérési pontokra illesztett egyenes. Látható, hogy a térerősséggel együtt az adatok szórása is nő.

3.2. A gyorsítófeszültség és az elektron-körpálya sugara

Adott gyorsítófeszültség és áramerősség (azaz térerősség) mellett lemértük az elektron által megtett kör sugarát. A 3.2. ábrán látható eredményeket kaptuk.

Az (1.3) egyenletből felírhatjuk az alábbi egyenlőséget:

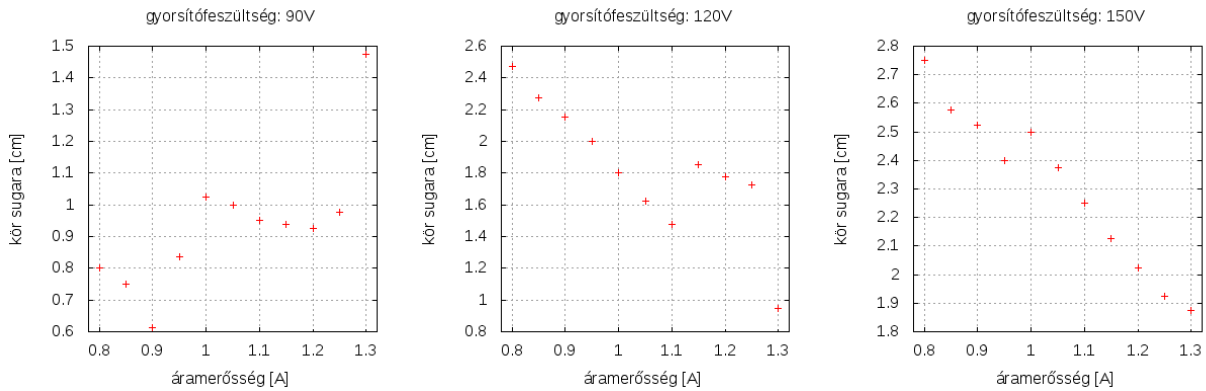
$$\frac{1}{B^2} = \frac{e}{m_e} \frac{r^2}{2U} \quad (3.3)$$

r^2/U és $1/B^2$ közötti lineáris összefüggést kapunk, mely az elektron fajlagos töltésével arányos. r^2/U -t és $1/B^2$ -t a mért adatokból kifejezve, és a 3.3. ábrán ábrázolva látható, hogy az adatok szórása igen nagy. A 120V és 150V-os gyorsítófeszültség mellett mért értékekre egyenest illesztettünk, melynek meredeksége

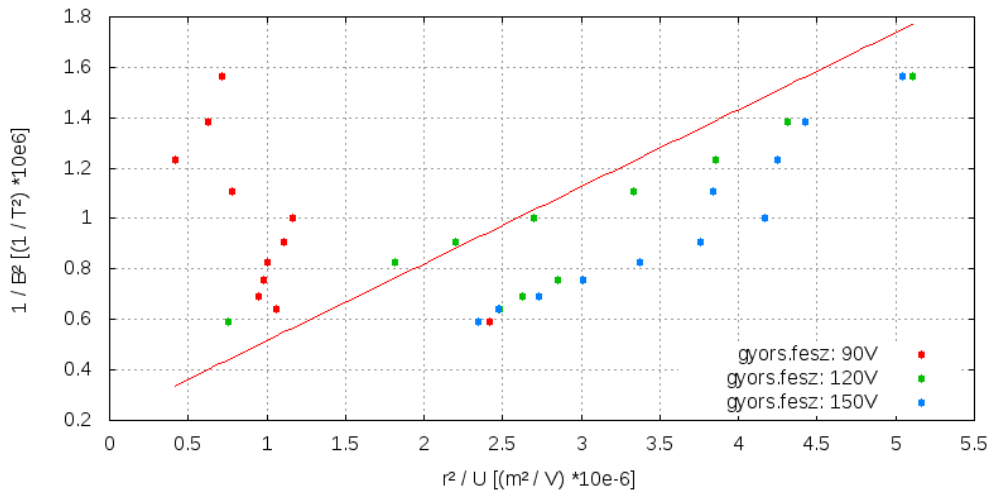
$$(3.06 \pm 0.40) \cdot 10^{11} \frac{V}{m^2 T^2}$$

nagyságúnak adódott. Ez már nagyságrendileg megfelel az elektron fajlagos töltésének, ám az arányossági tényező annak kétszerese, így az elektron fajlagos töltésére kapott érték:

$$(1.53 \pm 0.20) \cdot 10^{11} \frac{C}{kg}$$



3.2. ábra. Az elektron-körpálya sugara különböző gyorsítófeszültségek és tekercs-áramok mellett. 90V-os gyorsítófeszültség mellett, főleg nagy térerősségnél az elektron nem körpályát futott be.



3.3. ábra. Az elektron tömeg-töltés arányát meghatározó egyenesillesztés.

I [A]	r [cm]	B [mT]	$1/B^2$ [1/mT ²]	r^2/U [mm ² /V]
0.8	1.6	0.72	1.929	2.844
0.85	1.5	0.765	1.709	2.5
0.9	1.225	0.81	1.524	1.667
0.95	1.675	0.855	1.368	3.117
1	2.05	0.9	1.235	4.669
1.05	2	0.945	1.120	4.444
1.1	1.9	0.99	1.020	4.011
1.15	1.875	1.035	0.934	3.906
1.2	1.85	1.08	0.857	3.803
1.25	1.95	1.125	0.790	4.225
1.3	2.95	1.17	0.731	9.669

3.2. táblázat. Mért és számolt értékek a fajlagos töltés meghatározásához 90 V gyorsítófeszültségnél.

I [A]	r [cm]	B [mT]	$1/B^2$ [1/mT ²]	r^2/U [mm ² /V]
0.8	4.95	0.72	1.929	20.42
0.85	4.55	0.765	1.709	17.25
0.9	4.3	0.81	1.524	15.41
0.95	4	0.855	1.368	13.33
1	3.6	0.9	1.235	10.8
1.05	3.25	0.945	1.120	8.802
1.1	2.95	0.99	1.020	7.252
1.15	3.7	1.035	0.934	11.41
1.2	3.55	1.08	0.857	10.5
1.25	3.45	1.125	0.790	9.919
1.3	1.9	1.17	0.731	3.008

3.3. táblázat. Mért és számolt értékek a fajlagos töltés meghatározásához 120 V gyorsítófeszültségnél.

I [A]	r [cm]	B [mT]	$1/B^2$ [1/mT ²]	r^2/U [mm ² /V]
0.8	5.5	0.72	1.929	20.17
0.85	5.15	0.765	1.709	17.68
0.9	5.05	0.81	1.524	17
0.95	4.8	0.855	1.368	15.36
1	5	0.9	1.235	16.67
1.05	4.75	0.945	1.120	15.04
1.1	4.5	0.99	1.020	13.5
1.15	4.25	1.035	0.934	12.04
1.2	4.05	1.08	0.857	10.94
1.25	3.85	1.125	0.790	9.882
1.3	3.75	1.17	0.731	9.375

3.4. táblázat. Mért és számolt értékek a fajlagos töltés meghatározásához 150 V gyorsítófeszültségnél.

4. Hibaszámítás

A mérés során a következő mérési hibák léptek fel:

- A Helmholtz áramot és a nagyfeszültséget a digitális kijelzőn egy tizedesjegy pontossággal tudtuk meghatározni (így azok bizonytalansága $0.05A$ ill. $0.05V$)
- A vonalzó leolvasása nem volt egyszerű, a bizonytalanságot vehetnénk mindkét oldalon 5-5mm-nek, ám a leolvasás következetes volt (legalábbis szakaszosan, lásd: 3.2. ábra), így ezt vehetjük az átmérő esetén 5mm-nek, ami a sugárnál 2.5mm.
- A reprodukálhatóság során a korábbi mérésektől való relatív eltérés átlagát vettük, mely (8%)

Maximális abszolút hibával számolva:

$$\Delta B = (\Delta kI) + (k\Delta I) = (0.051 \cdot 0.95) + (0.9 \cdot 0.05) = 0.093mT = 9.3 \cdot 10^{-5}T \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} \Delta \frac{e}{m_e} &= \left(\frac{4U}{r^2 B^3} \Delta B \right) + \left(\frac{4U}{r^3 B^2} \Delta r \right) = \\ &= \left(\frac{4 \cdot 135}{0.035^2 0.001^3} 9.3 \cdot 10^{-5} \right) + \left(\frac{4 \cdot 135}{0.035^3 0.001^2} 2.5 \cdot 10^{-3} \right) = \\ &= (4.1 \cdot 10^{10}) + (3.14 \cdot 10^{10}) = 6.18 \cdot 10^{10} \frac{C}{kg} \end{aligned}$$

5. A Wehnelt-henger vizsgálata

Az elektronforrás része a Wehnelt-henger is, mely a katódhoz közel helyezkedik el, és csak azokat az elektronokat engedi eljutni a anódhoz, melyek a rajta található lyukon átjutnak, ezáltal fókuszálja a nyalábot. A Wehnelt-hengerre negatív feszültség kapcsolható, mely tovább szeparálja az elektronokat.

A laboratóriumi gyakorlat végén kvalitatívan vizsgáltuk a Wehnelt-hengerre kapcsolt feszültség hatását az elektronnyalábra és a kör sugarára. Azt tapasztaltuk, hogy a szűrő feszültségét növelve a körpálya sugara, illetve a nyaláb intenzitása is csökken.

6. Diskusszió

Az elektron fajlagos töltésének irodalmi értéke:

$$1.7588 \cdot 10^{11} \frac{C}{kg}$$

Az általunk, egyenesillesztésből kapott érték:

$$(1.53 \pm 0.20) \cdot 10^{11} \frac{C}{kg}$$

Ez nagyságrendileg közel van, ám hibahatáron kívül. A hibaszámítás során kapott hibával:

$$(1.53 \pm 0.62) \cdot 10^{11} \frac{C}{kg}$$

Ez a kb. 40%-os hiba reálisnak tekinthető, így nagyságrendileg helyesen meghatároztuk az elektron fajlagos töltését.

Hivatkozások

- [1] <http://wigner.elte.hu/koltai/labor/parts/modern19.pdf>