Martin Beránek, 3.F

Úloha A9 – Studium ionizačních komor

Pracovní úkol:

1. Proveďte graduaci stupnice elektrometru ve voltech a stanovte jeho citlivost.
2. Změřte charakteristiku komory pro záření alfa.
3. Stanovte relativní aktivity dvou zářičů alfa.
4. Změřte ionizační proud komory pro záření alfa v závislosti na vzdálenosti elektrod kondenzátoru. Vysvětlete naměřenou závislost.
5. Stanovte relativní aktivity dvou zářičů beta.

Teorie: Při měření se sleduje napětí na vzduchovém kondenzátoru. Z průběhu napětí lze určit úbytek náboje na deskách kondenzátoru za čas, který je způsoben vedením proudu v částečně ionizovaném vzduchu mezi kondenzátory. K ionizaci dochází z části přirozeně (kosmickým zářením, aktivitou pozadí, ...), ale pro experiment je důležité zvýšení této přirozené ionizace vložením radioaktivního zářiče do kondenzátoru.

Počet ionizovaných atomů je přímo úměrný aktivitě zářiče, takže musí být úměrný i naměřený úbytek náboje kondenzátoru. Při nízké intenzitě pole mezi deskami nedopadnou všechny ionty na kondenzátor, takže při zvyšování napětí (a tedy i intenzity pole) se zvyšuje i vybíjecí proud. Při určitém napětí dojde k nasycenému stavu, kdy všechny vzniklé ionty přispívají k vybíjecímu proudu. Další nárůst napětí už nebude mít vliv na rychlost vybíjení. Ke změně dojde až při dalším podstatném zvýšení napětí, kdy urychlené ionty získají dostatečnou energii, aby způsobili sekundární ionizaci a tím opět zvýšili vybíjecí proud.

Velikost ionizačního proudu při daném napětí (takovém, aby nedocházelo k sekundární ionizaci) závisí na počtu částic záření, které zinteragují mezi deskami kondenzátoru. Tento počet je přímo úměrný aktivitě vzorku a souvisí i se střední volnou dráhou částic a s rozměry kondenzátoru. Pokud budu měřit stejné izotopy ve stejném uspořádaní experimentu, bude poměr zjištěných ionizačních proudů roven poměru aktivit vzorků.

Pokud budu měnit vzdálenost elektrod deskového kondenzátoru, bude se tím měnit i množství částic interagujících v kondenzátoru. To se samozřejmě projeví na vybíjecím proudu. Za předpokladu, že většina částic opouští zářič ve směru kolmém na desku kondenzátoru mohu napsat vztah

$$I \sim 1 - \exp\left(-\frac{d-d_0}{l}\right), \tag{1}$$

kde d je vzdálenost desek kondenzátoru, d_0 vzdálenost zářiče od bližší desky a l střední volná dráha vyzařovaných α-částic ve vzduchu.

Měření: Nejprve jsme zkalibroval používaný elektrometr podle údajů voltmetru na zdroji. Voltmetr měl stupnici do 100 V a třídu přesnosti 2,5. Hodnoty naměřené při kalibraci proti dílkům stupnice elektrometru jsou uvedeny v tabulce 1. Po provedení lineární regrese vyjde převodní koeficient $k = (1{,}01 \pm 0{,}01)$ V/dílek.

U [dílků]	18,5	38,0	57,0	78,5	89,0	100,0
U [V]	20,0	40,0	60,0	80,0	90,0	98,5

Tabulka 1 – kalibrace elektrometru

Dále jsem měřil charakteristiku komory pro zkoumání záření α při vzdálenosti desek $d = 30$ mm a vloženém vzorku ^{239}Pu (označeném EA14). Protože se nijak neměnilo uspořádání pokusu, zůstávala kapacita sestavy stejná a platí tedy $\Delta U \sim \Delta Q$. Díky tomu mohu určit relativní hodnotu vybíjecího proudu jako změnu napětí mezi deskami za čas. Nastavoval jsme různá počáteční napětí a měřil jsme, za jak dlouho klesne o 3 dílky stupnice elektrometru. Získanou hodnotu je ještě potřeba upravit o udávaný svod α komory – $S_\alpha = 0{,}0020$ dílku/s (předpokládám, že tento svod je nezávislý na vzdálenosti desek). Pro vybíjecí proud I pak musí platit

$$I \sim \frac{\Delta U}{\Delta t} - S_\alpha\,. \tag{2}$$

Naměřené časy (průměr pěti měření), za které napětí pokleslo o 3 dílky a přepočtené vybíjecí proudy jsou uvedeny v tabulce 2. V prvním řádku je počáteční napětí mezi deskami. Naměřené hodnoty jsou také vyneseny v grafu 1.

U [V]	10,1	20,2	30,3	40,4	50,5	60,6	70,7	80,8	90,9	101,0
t [s]	24,6	21,76	16,24	15,36	13,76	13,24	12,68	11,32	11,6	10,2
σ_t [s]	1,7	1,1	1,1	0,4	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3	0,4
I [rel]	0,12	0,14	0,18	0,20	0,22	0,23	0,24	0,27	0,26	0,30
σ_I [rel]	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02

Tabulka 2 – charakteristika alfa komory

Je vidět, že komora se ani při nejvyšších použitelných napětích nedostane do oblasti nasyceného proudu. Pro získání co nejlepší přesnosti měření budu dále používat horní část rozsahu možných napětí na deskách.

Dalším úkolem bylo stanovit relativní aktivitu dvou vzorků. U prvního vzorku jsme měřil dobu, za kterou kleslo napětí na deskách ze 100 dílků stupnice na 80 dílků. U druhého vzorku byl pokles napětí znatelně pomalejší. Měřil jsem různě velké poklesy napětí okolo hodnoty 90 dílků. Naměřené výsledky pro vzorek EA14 jsou uvedeny v tabulce 3 a výsledky pro vzorek EA13 v tabulce 4. V obou případech byla vzdálenost desek $d = 30\,\mathrm{mm}$.

ΔU [dílků]	20	20	20	20	20	20	20
Δt [s]	75,2	76,0	75,8	75,6	72,3	72,0	74,2
I [rel]	0,264	0,261	0,262	0,263	0,275	0,276	0,268

Tabulka 3 – vybíjecí proud se vzorkem EA14

ΔU [dílků]	10	5	5	2	2	2	2
Δt [s]	223,0	117,6	121,8	43,0	43,8	43,4	42,2
I [rel]	0,043	0,041	0,039	0,045	0,044	0,044	0,045

Tabulka 4 – vybíjecí proud se vzorkem EA13

Výsledné hodnota vybíjecího proudu (opravené o svod komory) jsou

$$I_{\mathrm{EA14}} = (0{,}267 \pm 0{,}007)\,\mathrm{rel} \qquad \text{a} \qquad I_{\mathrm{EA13}} = (0{,}042 \pm 0{,}003)\,\mathrm{rel}\,.$$

Proud se vzorkem I_{EA14} byl počítán jako průměr zjištěných hodnot, proud I_{EA13} pak jako vážený průměr s ohledem na velikost ΔU. Uváděné chyby plynou ze statistického rozptylu zjištěných dat a z odhadu chyby elektrometru a určení času.

Jak jsem zmínil v teorii, poměr vybíjecích proudů odpovídá poměru aktivity vzorků, takže platí

$$\mathrm{A(EA14)} : \mathrm{A(EA13)} = 6{,}3 \pm 0{,}5\,.$$

Následně jsme měřil závislost vybíjecího proudu na vzdálenosti desek. V tomto případě už není kapacita aparatury konstantní a musím vycházet ze vztahu pro kapacitu. Platí

$$I = \left(\frac{\Delta U}{\Delta t} - S_\alpha\right) C\,, \tag{3}$$

kde S_α je opět svod komory a C kapacita aparatury.

Kapacitu mohu určit z měření při kterém nechám kondenzátor odpojený od zdroje a bez vloženého zářiče. Při změně vzdálenosti desek se bude měnit napětí. Protože náboj zůstává konstantní (pokud budu měřit dostatečně rychle, aby bylo možné zanedbat svod), platí

$$C \sim \frac{1}{U}\,. \tag{4}$$

Tím zjistím pouze relativní kapacitu, ale pro určení závislosti vybíjecího proudu na vzdálenosti desek to stačí.

Provedl jsme pět měření s různým počátečním napětím na kondenzátoru. V tabulce 5 jsou uvedeny výsledné hodnoty relativní kapacity pro různé vzdálenosti desek.

d [mm]	10	20	30	40	50	60
C [rel]	1,00	0,74	0,67	0,64	0,63	0,62

Tabulka 5 – kapacita soustavy s alfa komorou

Jak je vidět, kapacita soustavy se chová tak, jako by to byly dva paralelně spojené kondenzátory. (Pro rostoucí vzdálenost desek kapacita neklesá k nule, ale blíží se k nějaké vyšší hodnotě a naopak při přibližování desek prudce narůstá.) Jedna kapacita je samozřejmě sama α-komora a druhá kapacita je elektrometr. Nic dalšího už do obvodu připojeno není. Takže mohu psát, že pro kapacitu soustavy platí

$$C = \frac{k}{d} + C_0 \,, \tag{5}$$

kde k je konstanta charakterizující komoru a C_0 kapacita elektrometru. Tuto závislost proložím hodnotami z tabulky 5 a výsledek je zobrazen v grafu 2. Získal jsme tím konkrétní hodnoty $k = (4{,}6 \pm 0{,}2)\,\mathrm{rel/mm}$ a $C_0 = (0{,}53 \pm 0{,}01)\,\mathrm{rel}$.

Na základě vztahu (5) mohu doplnit rovnici (3), tedy

$$I = \left(\frac{\Delta U}{\Delta t} - S_\alpha\right) . \left(\frac{k}{d} + C_0\right) . \tag{6}$$

Měřil jsem pokles napětí na deskách α-komory při vloženém vzorku EA14. Pro každou možnou vzdálenost desek jsem měřil čtyři nebo více časových údajů. Při vzdálenosti $d = 10\,\mathrm{mm}$ byl vybíjecí proud velmi malý, takže jsme sledoval pouze čas poklesu napětí o 5 V, v ostatních případech pak o 20 V. Pro vzdálenost $d = 30\,\mathrm{mm}$ jsme použil data naměřená v rámci předchozích úkolů. Naměřené průměrné časy a vybíjecí proudy spočítané podle vztahu (6) jsou sepsány v tabulce 6.

d [mm]	10	20	30	40	50	60
ΔU [V]	5,05	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2
t [s]	118	127,1	74	60,8	58,9	58,5
σ_t [s]	5	0,5	2	0,2	0,1	0,2
I [rel]	0,04	0,12	0,18	0,21	0,21	0,21
σ_I [rel]	0,04	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01

Tabulka 6 – závislost vybíjecího proudu na vzdálenosti desek

Tyto naměřené hodnoty by mělo jít proložit křivkou (1). Výsledek tohoto proložení je v grafu 3. Při tom vyšly příslušné koeficienty $d_0 = (9 \pm 2)\,\mathrm{mm}$ a $l = (12 \pm 3)\,\mathrm{mm}$.

Druhou částí úlohy je měření aktivity vzorků ^{90}Sr v β-komoře. Úkolem bylo pouze porovnat aktivitu dvou vzorků, k čemuž stačí porovnat vybíjecí proudy. Svod β-komory je udáván $S_\beta = 0{,}0017\,\mathrm{dílku/s}$. Měřil jsem dobu, za kterou pokleslo napětí ze 100 V na 95 v. Pro každý ze vzorků jsme provedl tři měření.

Pro vzorek (3537) vychází $t_{(3537)} = (152 \pm 5)\,\mathrm{s}$ a pro vzorek (3536) $t_{(3536)} = (182 \pm 5)\,\mathrm{s}$. Z toho pak přímo plyne poměr aktivit

$$\mathrm{A}(3537) : \mathrm{A}(3536) = 1{,}212 \pm 0{,}001 \,.$$

Diskuze: Závislost vybíjecího proudu na vzdálenosti desek jsem v teoretické části odhadl na základě předpokladu, že část α-částic bude pohlcena až v deskách kondenzátoru a nezpůsobí žádnou ionizaci vzduchu. Z toho a z předpokladu, že většina částic bude vylétat přibližně kolmo na desku kondenzátoru (tak, aby šlo považovat kosinus úhlu za jedničku) jsem odvodil vztah (1). Po naměření experimentálních dat jsme jimi tuto křivku zkusil proložit. Jak je vidět z grafu 3, poměrně dobře odpovídá naměřeným údajům, i když jsou hodnoty jednotlivých koeficientů zatíženy velkou chybou.

Vzdálenost zdroje radioaktivních částic od desky vyšla $(9 \pm 2)\,\mathrm{mm}$. To alespoň přibližně odpovídá šířce vzorku položeného na kondenzátoru. Dále vychází střední dolet částic ve vzduchu $(12 \pm 3)\,\mathrm{mm}$. K tomuto údaji se mi nepodařilo najít žádnou tabulkovou hodnotu. Mohu pouze vycházet z údaje uvedeného v [1], že i nejenergetičtější α částice vznikající přirozeným rozpadem mají ve vzduchu dolet pod 9 cm. Z výše uvedeného středního doletu vychází, že po devíti centimetrech bude pohlceno asi 99,99% částic. Střední dolet tedy bude alespoň řádově odpovídat skutečnosti. Pokud by byl několikrát vyšší, klesne velmi znatelně procento pohlcených částic.

Na základě výše zmíněných skutečností tedy mohu tvrdit, že závislost vybíjecího proudu na vzdálenosti desek je pro tuto aparaturu dána vztahem (1) a vysvětluje ji fakt, že část α částic dopadne na desky kondenzátoru, aniž by zionizovaly vzduch.

Závěr: Zkalibroval jsme stupnici elektrometru. Proměřil jsem charakteristiku α-komory v dostupném rozsahu napětí – výsledek je vynesen v grafu 1. Porovnal jsme aktivitu dvou vzorků ^{239}Pu a získal jsem výsledek $\mathrm{A(EA14)} : \mathrm{A(EA13)} = 6{,}3 \pm 0{,}5$.

Určil jsme závislost vybíjecího proudu na vzdálenosti desek (viz graf 3) a teoreticky vysvětlil a popsal rovnicí (1). Pro tuto konkrétní aparaturu a použité vzorky vychází koeficienty $d_0 = (9 \pm 2)$ mm a $l = (12 \pm 3)$ mm.

Porovnal jsme aktivitu dvou vzorků β-zářiče (^{90}Sr). Vyšel mi poměr $\mathrm{A}(3537) : \mathrm{A}(3536) = 1{,}212 \pm 0{,}001$

Literatura:

[1] D. Nosek, V. Vorobel: text k úloze A2, 2003
[2] A. Beiser: Úvod do moderní fyziky, Academia, Praha 1978