

1. Zadání

1. 1. Pracovní úkol

1. Pomocí ionizační komory (IK) zjistěte, který z přiložených radioaktivních vzorků má větší aktivitu.
2. Změřte V-A charakteristiky IK v rozsahu 0-500 V při různých vzdálenostech elektrod 1-6 cm. Použijte intenzivnější zářič.
3. Identifikujte charakteristické oblasti V-A závislostí. Určete optimální napětí a optimální vzdálenost elektrod IK.
4. Změřte závislost svodového proudu na napětí v rozsahu 0-500 V při optimální vzdálenosti elektrod.
5. Změřte poměr aktivit přiložených zářičů, odhadněte jejich absolutní aktivity (střední energie na vytvoření iontového páru ve vzduchu je 35 eV). Stanovte dosah α -částic ve vzduchu.
6. Pomocí osciloskopu změřte závislost amplitudy elektrického impulzu Geiger-Müllerova (GM) detektoru na napětí v rozsahu 0-1500 V. Nepřekračujte napětí 1500V aby nedošlo k destrukci GM detektoru!
7. Identifikujte charakteristické oblasti V-A závislosti GM detektoru.

1. 2. Pomůcky

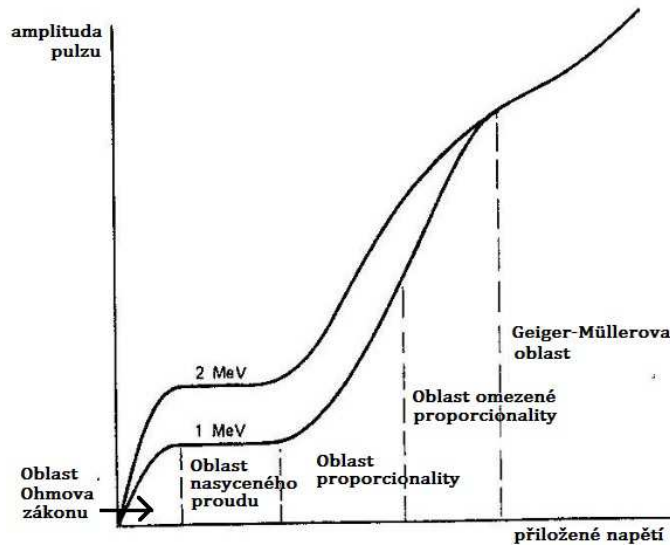
ionizační komora, pikoampérmetr KEITHLEY 6487, Geiger-Müllerův detektor, přístroj NEMEC, zářiče ^{239}Pu EA13 a ^{239}Pu EA14

2. Teoretický úvod¹

2. 1. Charakteristika plynových detektorů

Měření a srovnávání aktivit radioaktivních vzorků lze provádět metodami založenými na ionizačních účincích záření v plynech. Letí-li ionizující částice plynem, vznikají podél její trajektorie ionty (kladné a záporné) nebo volné elektrony. Nastane-li takováto ionizace mezi deskami kondenzátoru, na které je přivedeno napětí, putují vzniklé částice k jednotlivým elektrodám a deskami kondenzátoru prochází ionizační proud.

Závislost ionizačního proudu na napětí přiloženém na desky kondenzátoru má typický průběh a lze ji rozdělit do několika oblastí. Tato závislost je znázorněna na *Obr. 1*.



Obr. 1: Typický průběh charakteristiky plynového detektoru

- **Oblast Ohmova zákona:** Bez přiloženého napětí vzniklé ionty rekombinují a neprocházejí proud. Po připojení náhlého napětí se ionty začnou pohybovat k odpovídajícím elektrodám rychlostí úměrnou intenzitě elektrického pole.
- Při dalším zvyšování napětí klesá šance na rekombinaci díky velké rychlosti odsávání iontů. Nárůst proudu není již tak prudký.
- **Oblast nasyceného proudu:** Při ještě vyšším napětí je rekombinace iontů zcela potlačena a veškerý vytvořený volný náboj přispívá k ionizačnímu proudu. Ionizační proud je tedy závislý pouze na celkovém množství náboje vzniklého ionizací, díky čemuž je konstantní. V této oblasti pracují ionizační komory.
- **Oblast lavinového zesílení:** Elektrony vzniklé primární ionizací mohou být elektrickým polem urychleny tak, že získají dostatečnou energii na to, aby samy ionizovaly další (sekundární) neutrální molekuly v plynu. Tím se počet nabitých částic lavinově zvyšuje.
 - **Oblast proporcionality:** Je to oblast, kdy lavinové zesílení nezávisí na primární ionizaci. Ionizační proud je tedy úměrný počtu vzniklých iontových párů. Tato oblast se využívá pro provoz proporcionalních počítačů.
 - **Oblast omezené proporcionality:** Díky tomu, že se volné elektrony pohybují velice rychle a kladné ionty naopak velmi pomalu, dojde k zeslabení intenzity elektrického pole a lavinový efekt je menší.

¹ Napsáno na základě [1]

- **Geiger-Müllerova oblast:** Později se elektrická intenzita redukuje natolik, že už nemůže docházet k lavinovému násobení a všechny impulzy detektoru mají stejnou amplitudu. V této oblasti pracují Geiger-Müllerovy počítače.

2. 2. Aktivita zářiče

Poměr aktivit dvou zářičů můžeme vypočíst ze vztahu

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{I_1}{I_2} \quad (1)$$

kde $A_{1/2}$ je aktivita prvního/druhého zářiče a $I_{1/2}$ je jím vyvolaný ionizační proud. Podmínky měření ionizačních proudů musí být pro oba zářiče stejné.

Aktivitu jednoho zářiče lze v našem experimentu odhadnout pomocí vztahu

$$A = \frac{2IE_i}{e\bar{E}}, \quad (2)$$

kde I je ionizační proud, $e = 1,602 \cdot 10^{-19} C$ elementární náboj, E_i ionizační energie plynu a \bar{E} je energie středních ionizačních ztrát α -částic v komoře. Budeme-li předpokládat, že α -částice ztratí v detektoru veškerou svou energii, můžeme energii \bar{E} položit rovnu střední energii vyletujících α \bar{E}_0 . Koeficient 2 ve vzorci (2) vznikl díky předpokladům, že vzorek vyzařuje izotropně a že detektor zaujímá polovinu prostorového úhlu.

2. 3. Dolet α -částic

Dolet R α -částic o kinetické energii E_0 v rozmezí 4 - 7 MeV ve vzduchu při normálních podmínkách lze vypočíst ze vztahu dle [2]:

$$R = \xi E_0^{\frac{2}{3}}, \xi = 0,31 \text{ cmMeV}^{-\frac{3}{2}}. \quad (3)$$

3. Výsledky měření

3. 1. Určení aktivnějšího zářiče

Měli jsme dva zářiče: ^{239}Pu EA13 a ^{239}Pu EA14. Každý z nich jsme umístili do ionizační komory a při vzdálenosti elektrod $d = 6 \text{ cm}$ a napětí 500 V pomocí pikoampérmetru KEITHLEY 6487 změřili příslušné ionizační proudy:

$$^{239}\text{Pu EA13: } I = (0,0090 \pm 0,0005) \text{ nA}$$

$$^{239}\text{Pu EA14: } I = (0,0120 \pm 0,005) \text{ nA}$$

Chyby proudu jsou odhadnuty na základě pozorovaných fluktuací cifer na pikoampérmetru.

Aktivnějším zářičem tedy byl vzorek ^{239}Pu EA14.

3. 2. V-A charakteristiky IK při různých vzdálenostech elektrod

K měření jsme používali vzorek ^{239}Pu EA14. Jako zdroj napětí sloužil pikoampérmetr KEITHLEY 6487, který zároveň měřil ionizační proud. Napřed byla naměřena V-A charakteristika (závislost ionizačního proudu I na přiloženém napětí U) pro vzdálenost elektrod $d = 6 \text{ cm}$. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v *Tab. 1*. Chyba ionizační energie σ_I je stanovena stejně jako v *odstavci 3. 1*.

U [V]	I [nA]	σ_I [nA]	U [V]	I [nA]	σ_I [nA]
0	0,00025	0,00005	35	0,0097	0,0005
1	0,00034	0,00005	40	0,0098	0,0005
2	0,00072	0,00005	50	0,0102	0,0005
3	0,00137	0,00005	60	0,0108	0,0005
4	0,00207	0,00005	70	0,0109	0,0005
5	0,00280	0,00005	80	0,0108	0,0005
6	0,00355	0,00005	90	0,0109	0,0005
8	0,00484	0,00005	100	0,0112	0,0005
10	0,0060	0,0005	150	0,0116	0,0005
12	0,0068	0,0005	200	0,0118	0,0005
14	0,0073	0,0005	250	0,0121	0,0005
16	0,0074	0,0005	300	0,0122	0,0005
18	0,0076	0,0005	350	0,0123	0,0005
20	0,0076	0,0005	400	0,0123	0,0005
25	0,0088	0,0005	450	0,0123	0,0005
30	0,0091	0,0005	500	0,0121	0,0005

Tab. 1: V-A charakteristika IK pro vzdálenost elektrod $d = 6 \text{ cm}$

Pro napětí $U = 500 \text{ V}$ jsme stejným způsobem naměřili závislost ionizačního proudu I na vzdálenosti elektrod d . Naměřené hodnoty jsou uvedeny v *Tab. 2*.

d [cm]	I [nA]	σ_I [nA]
6	0,0121	0,0005
5	0,0127	0,0005
4	0,0124	0,0005
3	0,0110	0,0005
2	0,0067	0,0005
1	0,30	0,05

Tab. 2: Závislost ionizačního proudu IK na vzdálenosti elektrod

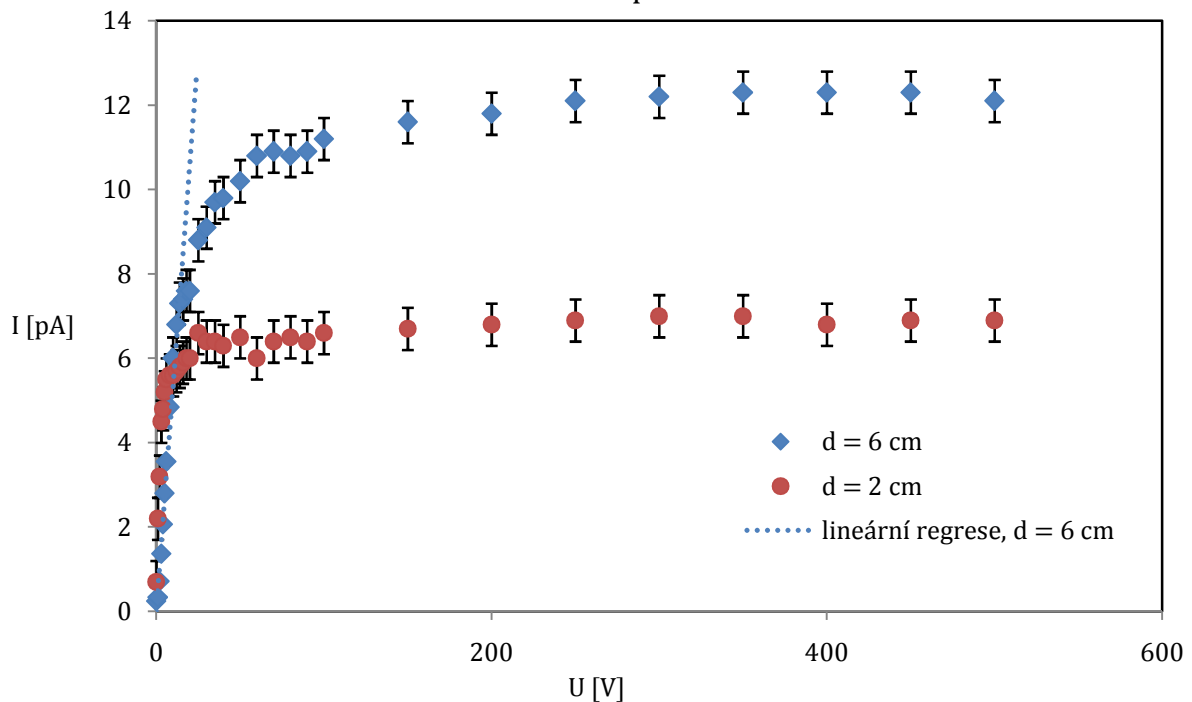
Jelikož ionizační proud I anomálně vzrostl pro vzdálenost elektrod $d = 1 \text{ cm}$, zvolili jsme pro měření další V-A charakteristiky IK vzdálenost elektrod $d = 2 \text{ cm}$. Naměřené hodnoty pro tuto závislost jsou uvedeny v *Tab. 3*.

U [V]	I [nA]	σ_I [nA]	U [V]	I [nA]	σ_I [nA]
0	0,0007	0,0005	35	0,0064	0,0005
1	0,0022	0,0005	40	0,0063	0,0005
2	0,0032	0,0005	50	0,0065	0,0005
3	0,0045	0,0005	60	0,0060	0,0005
4	0,0048	0,0005	70	0,0064	0,0005
5	0,0052	0,0005	80	0,0065	0,0005
6	0,0055	0,0005	90	0,0064	0,0005
8	0,0056	0,0005	100	0,0066	0,0005
10	0,0056	0,0005	150	0,0067	0,0005
12	0,0057	0,0005	200	0,0068	0,0005
14	0,0058	0,0005	250	0,0069	0,0005
16	0,0059	0,0005	300	0,0070	0,0005
18	0,0060	0,0005	350	0,0070	0,0005
20	0,0060	0,0005	400	0,0068	0,0005
25	0,0066	0,0005	450	0,0069	0,0005
30	0,0064	0,0005	500	0,0069	0,0005

Tab. 3: V-A charakteristika IK pro vzdálenost elektrod $d = 2 \text{ cm}$

Hodnoty z *Tab. 1* a *Tab. 3* jsou zpracovány v *Grafu 1*. Pro $d = 6 \text{ cm}$ je prvními jedenácti hodnotami proložena přímka. Její rovnice je $I[\text{nA}] = (0,0053 \pm 0,0002)U[\text{V}]$.

Graf 1: V-A charakteristika IK pro 2 různé vzdálenosti elektrod



Graf jsem propojila od ruky pastelkou 😊

3. 3. Charakteristické oblasti V-A charakteristiky IK, ideální napětí a vzdálenost elektrod

Ve V-A charakteristice ionizační komory naměřené v 3. 2. (viz *Graf 1*) jasně vidíme některé oblasti popsané v 2. 1. Napřed pozorujeme oblast Ohmova zákona, která se dá dobře aproximovat lineární závislostí (viz lineární regrese v *Grafu 1*). Dále zaznamenáváme zmírnění nárůstu proudu a od napětí kolem 150 V je patrná oblast nasyceného proudu.

Z teorie víme, že IK pracuje nejlépe v oblasti nasyceného proudu. Můžeme proto říct, že ideální napětí bylo $U = 200$ až 500 V. Z *Tab. 2* vidíme, že optimální vzdálenost elektrod (ta, při které dostáváme nejvyšší hodnoty ionizačního proudu) byla při našich možnostech experimentu v rozmezí $d = 4$ až 6 cm. Dále však budeme pracovat s hodnotou $d = 6$ cm.

3. 4. Svodový proud

Pro vzdálenost elektrod $d = 6$ cm jsme změřili závislost svodového proudu v IK (prázdné – bez vzorků) na přiloženém napětí. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v *Tab. 4*. Vidíme, že svodový proud byl při všech napětích prakticky nulový a jeho vliv na měření můžeme tedy vzhledem k ostatním chybám měření proudu zanedbat.

U [V]	I [nA]	σ_I [nA]
0	0,00001	0,00001
20	0,00002	0,00001
40	0,00003	0,00001
60	0,00002	0,00001
80	0,00003	0,00001
100	0,00005	0,00002
200	0,00003	0,00002
300	0,00005	0,00002
400	0,00004	0,00002
500	0,00003	0,00002

Tab. 4: Závislost svodového proudu IK na přiloženém napětí

3. 5. Výpočet aktivit zářičů doletu α -částic

Poměr aktivit vzorků ^{239}Pu EA13 a ^{239}Pu EA14 určíme ze vztahu (1) dosazením ionizačních proudů I naměřených v 3. 1. Veličiny pro vzorek ^{239}Pu EA13 indexujeme 1, pro vzorek ^{239}Pu EA14 2. Chybu určíme metodou přenosu chyb dle [3].

$$\frac{A_1}{A_2} = 0,075 \pm 0,005$$

Aktivitu A vzorku ^{239}Pu EA14 spočteme ze vztahu (2). Za proud I dosazujeme hodnotu $I = (0,0121 \pm 0,0005)\text{nA}$ naměřenou při napětí $U = 500$ V pro vzdálenost desek kondenzátoru $d = 6$ cm v 3. 2. Střední energie E_i je dle 1. 1. 35 eV. Střední energii vyletujících α -částic \overline{E}_0 vypočteme váženým průměrem energií α -částic tabelovaných v [4]: 5,157 MeV (73%), 5,144 MeV (15%) a 5,106 MeV (11,5%) $\Rightarrow \overline{E}_0 = 5,149$ MeV. Výsledek výpočtu:

$$A = A_2 = (1030 \pm 40)Bq$$

Odsud můžeme pomocí vypočteného poměru $\frac{A_1}{A_2}$ odhadnout také aktivitu A_1 vzorku ^{239}Pu EA14:

$$A_1 = (77 \pm 6)Bq$$

Chyby jsou stanoveny metodou přenosu chyb dle [3].

Dolet R α -částic ve vzduchu vypočteme ze vztahu (3) dosazením $\overline{E_0} = E_0$:

$$R = 3,6 \text{ cm}$$

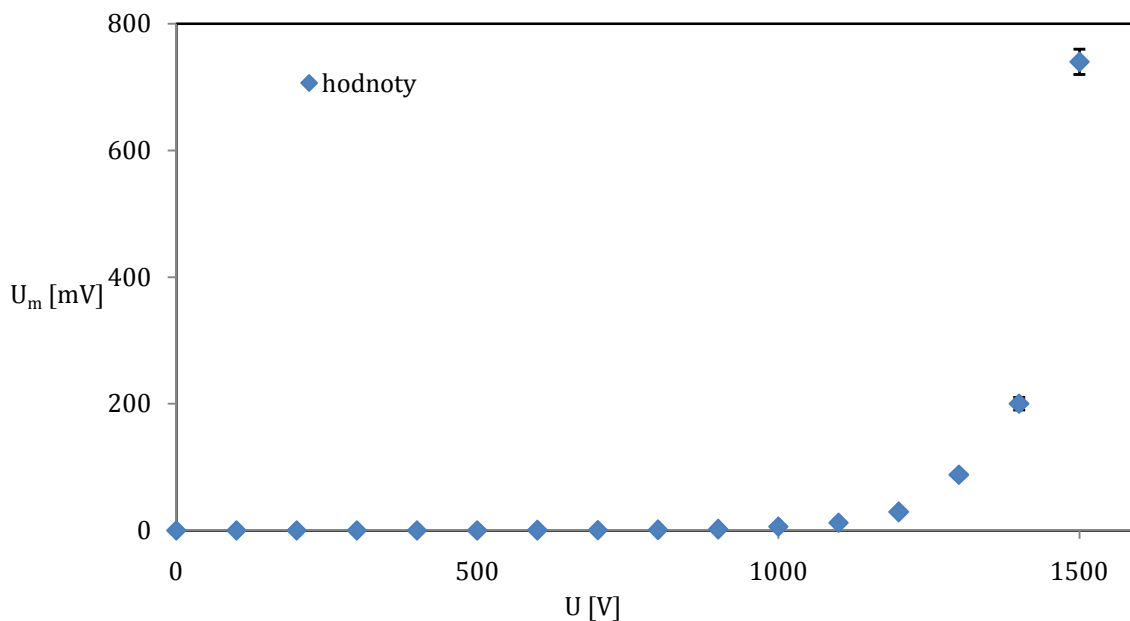
3. 6. Závislost amplitudy elektrického impulsu GM detektoru na napětí

Radioaktivní vzorek ^{239}Pu EA14 byl umístěn na vstupní okénko Geiger-Müllerova detektoru. Elektrický impuls z detektoru byl převeden na y-ovou osu osciloskopu a byla měřena závislost jeho amplitudy U_m na napětí U generovaném přístrojem NEMEC. Pro měření byly použity rozsahy 4 mV, 8 mV, 40 mV, 160 mV, 400 mV a 800 mV. Chyba měření amplitudy σ_{U_m} je u nižších napětí stanovena jako polovina nejmenšího dílku (*rozsah* $\cong 40$ dílků), u vyšších jako celý dílek. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 5 a závislost je zpracována v Grafu 2.

U [V]	U_m [mV]	σ_{U_m} [mV]
0	0	0,1
100	0	0,1
200	0	0,1
300	0	0,1
400	0	0,1
500	0,1	0,1
600	0,2	0,1
700	0,4	0,1
800	0,8	0,2
900	1,8	0,2
1000	6	1
1100	12	1
1200	29	1
1300	88	4
1400	200	10
1500	740	20

Tab. 5: Charakteristika GM detektoru

Graf 2: Charakteristika GM detektoru



4. Diskuse výsledků

Měření ionizačního proudu IK pomocí přístroje KEITHLEY 6487 bylo zatíženo chybou danou fluktuacemi cifer na displeji. Tyto fluktuace byly pravděpodobně způsobeny střídavým nabíjením a vybíjením kondenzátoru. Zobrazované hodnoty byly vždy nějakou dobu pozorovány a následně byla odhadnuta jejich střední hodnota a chyba. Chyba přístroje udaná výrobcem nebyla zjištěna, ale soudíme, že by byla menší než chyba daná fluktuacemi. Svodový proud byl oproti měřeným hodnotám ionizačního proudu také zanedbatelný (viz *Tab. 4*), proto nebylo třeba kvůli němu nikterak korigovat ionizační proud.

Při měření závislosti ionizačního proudu na vzdálenosti desek kondenzátoru při konstantním bylo při vzdálenosti $d = 1 \text{ cm}$ zaznamenáno zvýšení tohoto proudu (viz *Tab. 2*). Tento jev vysvětlujeme tím, že se při této vzdálenosti elektrody téměř dotýkaly (nebo zcela dotýkaly) kovové izolace zářiče a díky tomu procházel proud.

Identifikace typických oblastí V-A charakteristiky pro IK podle *2. 1* byla velmi dobře možná (viz *Graf 1* a příslušná část *Obr. 1*). Identifikované oblasti jsou uvedeny v odstavci *3. 3*.

Stanovení doletu α -částic podle vzorce (3) bylo korektní, neboť energie α -částic vyletujících z plutonia leží v rozmezí 4 až 7 MeV. Díky tomu, že dolet R vychází menší než vzdálenost elektrod použitá k výpočtům aktivity ze vztahu (2) ($3,6 \text{ cm} < 6 \text{ cm}$), je také v pořádku předpoklad, že α -částice ztratila v detektoru veškerou energii. To, jestli vzorek vyzařoval izotropně a jestli detektor zaujímal polovinu prostorového úhlu, jsme nezjišťovali. Vzhledem k tomu, že byl vzorek umístěn do kovového krytu, byl prostorový úhel pravděpodobně menší než polovina prostorového (vzorek vyzařoval do prostoru kužele). Jelikož však neznáme potřebné parametry, bereme vzorec (2) jako dostatečný pro výpočet.

Z vypočteného doletu vzorku ^{239}Pu EA14 bychom také mohli stanovit optimální vzdálenost elektrod. Tato optimální vzdálenost musí být větší než dolet částic (tedy větší než 3,6 cm). Takto jsme optimální vzdálenost skutečně určili i na základě měření závislosti ionizačního proudu na vzdálenosti elektrod (viz *3. 3*).

Měření závislosti amplitudy elektrického impulzu GM detektoru na napětí pomocí osciloskopu bylo obtížnější pro vyšší napětí, při kterých byl maximální výběžek pouze pro krátkou dobu a na předem nepředvídatelném místě displeje osciloskopu. Pro tato napětí jsme proto zvyšovali odhad chyby měření.

V naměřené charakteristice pozorujeme pouze oblast proporcionality, kdy amplituda impulzů vykazuje silný nárůst při zvyšování napětí (viz *Graf 2*). Oblast omezené proporcionality ani GM oblast pozorovatelné nejsou. V GM oblasti by musela být amplituda impulzů konstantní.

5. Závěr

Pomocí IK jsme zjistili, že vzorek ^{239}Pu EA14 je aktivnější než vzorek ^{239}Pu EA13.

Pro vzorek ^{239}Pu EA14 jsme změřili V-A charakteristiky IK při vzdálenostech elektrod $d = 6\text{ cm}$ a $d = 2\text{ cm}$. Obě tyto charakteristiky jsou vyneseny v *Grafu 1*. V charakteristikách jsme identifikovali oblast Ohmova zákona a oblast nasyceného proudu. Optimální napětí jsme stanovili na rozmezí $U = 200$ až 500 V a optimální vzdálenost elektrod na $d = 4$ až 6 cm .

Změřili jsme závislost svodového proudu na napětí při optimální vzdálenosti elektrod. Zjistili jsme, že svodový proud je pro všechna napětí prakticky nulový.

Spočetli jsme poměr aktivit A_1 (zářič ^{239}Pu EA13) a A_2 (zářič ^{239}Pu EA14): $\frac{A_1}{A_2} = 0,075 \pm 0,005$.

Odhadli jsme absolutní aktivity: $A_1 = (77 \pm 6)\text{Bq}$, $A_2 = (1030 \pm 40)\text{Bq}$.

Stanovili jsme dosah R α -částic ve vzduchu: $R = 3,6\text{ cm}$.

Pomocí osciloskopu jsme změřili závislost amplitudy elektrického impulzu GM detektoru na napětí. Tato závislost je vynesena do *Grafu 2*.

Ve V-A závislosti GM detektoru se nám podařilo identifikovat oblast proporcionality.

6. Seznam použité literatury

- [1] Vorobel V.: Studium plynových detektorů,
http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/texty/txt_402.pdf (2013)
- [2] Nosek D., Vrzal V.: Spektrometrie záření α ,
http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/texty/txt_405.pdf (2013)
- [3] J. English: Základy zpracování fyzikálních měření, Praha 2006
- [4] Tables of Physical and Chemical Constants,
http://www.kayelaby.npl.co.uk/atomic_and_nuclear_physics/4_6/4_6_3.html (2013)

20 bodů