

Oddělení fyzikálních praktik při Kabinetu výuky obecné fyziky MFF UK

PRAKTIKUM ...

Úloha č.

Název:

Pracoval: stud. skup. dne

Odevzdal dne:

	Možný počet bodů	Udělený počet bodů
Práce při měření	0 – 5	
Teoretická část	0 – 1	
Výsledky měření	0 – 8	
Diskuse výsledků	0 – 4	
Závěr	0 – 1	
Seznam použité literatury	0 – 1	
Celkem	max. 20	

Posuzoval: dne

Pracovní úkoly

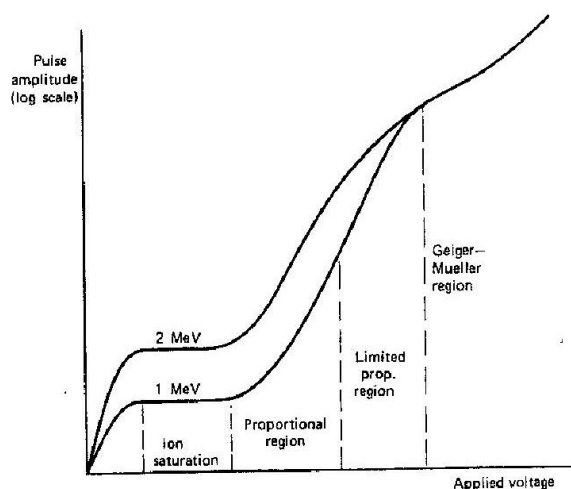
1. Pomocí ionizační komory (IK) zjistěte, který z přiložených radioaktivních zářičů má větší aktivitu.
2. Změřte V-A charakteristiky IK v rozsahu 0-500 V při různých vzdálenostech elektrod 1-6 cm. Použijte intenzivnější zářič.
3. Identifikujte charakteristické oblasti V-A závislosti. Určete optimální 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 impulsu Geiger-Müllerova (GM) detektoru na napětí v rozsahu 0-1500 V. Nepřekračujte napětí 1500 V, aby nedošlo k destrukci GM detektoru!
7. Identifikujte charakteristické oblasti V-A závislosti GM detektoru.

1 Teoretická část

1.1 Plynové detektory a jejich charakteristika

Jednou z nejběžnějších metod, kterou lze měřit aktivitu radioaktivních vzorků, je založena na ionizačních účincích záření v plynech. Dochází ke vzniku párů kladně a záporně nabitých iontů (resp. elektronů) podél dráhy ion. částice, čehož důsledkem se plyn stává vodivým. Pokud se tak stane v elektrickém poli mezi dvěma nabitými elektrodami (např. kondenzátor), začne procházet tzv. ionizační proud, jenž je závislý na energii ionizujícího záření, jeho intenzitě a napětí mezi elektrodami (deskami např.).

Tvar závislosti ionizačního proudu I v plynovém detektoru na přiloženém napětí U (V-A charakteristika) má svůj typický průběh (obr. 1). V běžných případech lze její tvar rozdělit do několika oblastí [1]



Obr. 1: Typický průběh charakteristiky plynového detektoru. Zdroj [1].

- **Oblast Ohmova zákona:** Bez vnějšího napětí na elektrodách vzniklé ionty úplně rekombinují, neprochází žádný proud. Přiložením napětí rychlost iontů pohybujících se k odpovídajícím elektrodám je přímo úměrná intenzitě el. pole, proto ionizační proud roste v zásadě přímo úměrně napětí.
- S čím dál tím větší rychlostí odsávání iontů z aktivní oblasti však klesá šance na jejich rekombinaci. Nárůst proudu se zvolňuje, ten přestává být přímo úměrný U .
- **Oblast nasyceného proudu:** Při dostatečně vysokém napětí je rekombinace iontů v detektoru zcela potlačena a veškerý volný náboj vytvořený ionizací přispívá k ionizačnímu proudu. Další zvyšování napětí nevede ke změně detekovaného proudu, jehož velikost závisí pouze na celkovém množství náboje vzniklého ionizací. Tato oblast je typická pro provoz ionizačních komor.

- **Oblast lavinového zesílení:** Při dosažení typické intenzity elektrického pole (10^6 V/m pro std. plyny) získají ionty (a elektrony) urychlováním v něm energii vyšší než je ionizační energie použitého plynu a mohou tak srážkou s neutrálními atomy v prostředí dát vzniknout sekundárním iontovým pářům. Každý elektron uvolněný primární ionizační zářením generuje určité množství sekundárních volných elektronů, které přispívají k elektrickému proudu.
- **Oblast proporcionality:** Lavinové zesílení je nezávislé na primární ionizaci. Proud je úměrný celkové ztrátě energie záření v komoře.
- **Oblast omezené proporcionality:** Zatímco volné elektrony dospějí k anodě velice rychle, těžké kladné ionty se během stejné doby téměř nepohnou z místa. Je-li jejich koncentrace dostatečně velká, tento prostorový náboj významně redukuje intenzitu el. pole. Následkem je zeslabení dalšího lavinového efektu.
- **Geigerova-Müllerova oblast:** Rozvoj laviny při tomto napětí probíhá jen do cvhíle, než vznikající prostorový náboj zredukuje el. intenzitu pole, pod hranici potřebnou k lavinovému zesílení. Pak mají všechny impulsy detektoru stejnou amplitudu, nezávislou na druhu a energii záření.

1.1.1 Ionizační komora

Použitá ionizační komora je vlastně velký vzduchový kondenzátor s nastavitelnou vzdáleností d elektrod, na něž je přivedeno napětí. V oblasti mezi nimi je umístěn zářič a při dostatečně velkém el. poli můžeme pomocí pikoampérmetru měřit signál z oblasti nasyceného proudu.

1.1.2 Geigerův-Müllerův počítač

Geigerův-Müllerův počítač pracuje nejlépe za Geigerovým-Müllerovým prahem. Lavinové zesílení vybudí silný proudový impuls, který je velice rychle utlumen (viz. výše). Má při daném vnějším napětí určitou neměnnou amplitudu, GM počítač tak pouze registruje částice záření (1 impuls = 1 zachycená částice). Za tímto účelem je konstruován jako koaxiální kondenzátor s drátkem uprostřed, anodou, obklopenou širším válcem, katodou (to z důvodu většího gradientu el. pole okolo anody). Výplň nejčastěji tvoří některý netečný plyn s příměsí těžkých alkoholů kvůli zachycení občasnou rekombinací vzniklých fotonů. Ty mohou po doputování ke katodě, prostřednictvím fotoefektu, uvolnit elektron a podnítit tak falešný signál.

1.1.3 Svodový proud

Díky tomu, že vzduch není dokonalým izolátorem, díky kosmickému záření a stopovým množstvím radioaktivních prvků, které jsou ve všech látkách, se komora vybíjí. Tento tzv. svodový proud je velice malý, ale v některých případech může být srovnatelný s ionizačním proudem.

1.2 Odhad aktivity zářiče

Množství iontových pářů, které α -částice podél své trajektorie v plynu vytvoří, závisí přímo úměrně na celkových ionizačních ztrátách částice ΔT v komoře a nepřímo na ionizační energii plynu E_i . Každý z uvolněných elektronů nese el. náboj e a podílí se tak na výsledném ionizačním proudu I :

$$I = e \frac{\overline{\Delta T}}{E_i} V, \quad (1)$$

kde $\overline{\Delta T}$ jsou střední ionizační ztráty α -částic v komoře a V je jejich množství, které za jednotku času vstoupí do aktivní oblasti detektoru (rychlost vnikání do detektoru).

Při předpokladu, že použitý zářič vyzařuje izotropně, pak jeho absolutní aktivita vedle V závisí na prostorovém úhlu, který detektor vzhledem ke vzorku zaujímá. Standartně se vzorek pokládá doprostřed ionizační komory na jednu z elektrod. Detektor tak zaujímá polovinu úplného prostorového úhlu.

1.2.1 Horní odhad ionizačních ztrát ΔT

V nejjednodušším případě předpokládejme, že α -částice ztratí v aktivní oblasti detektoru veškerou svou kinetickou energii, což v případě zářiče umístěného v, nebo na okraji komory znamená energii, s níž je ze zdroje emitována T_0 .

1.3 Dolet α -částic ve vzduchu

Pro dolet R α -částic o kinetických energiích T_0 z intervalu 4 až 7 MeV ve vzduchu při normálních podmínkách lze použít empirickou formuli (viz. [3])

$$R = \xi T_0^{\frac{3}{2}}, \quad \xi = 0.31 \text{cmMeV}^{-\frac{3}{2}}. \quad (2)$$

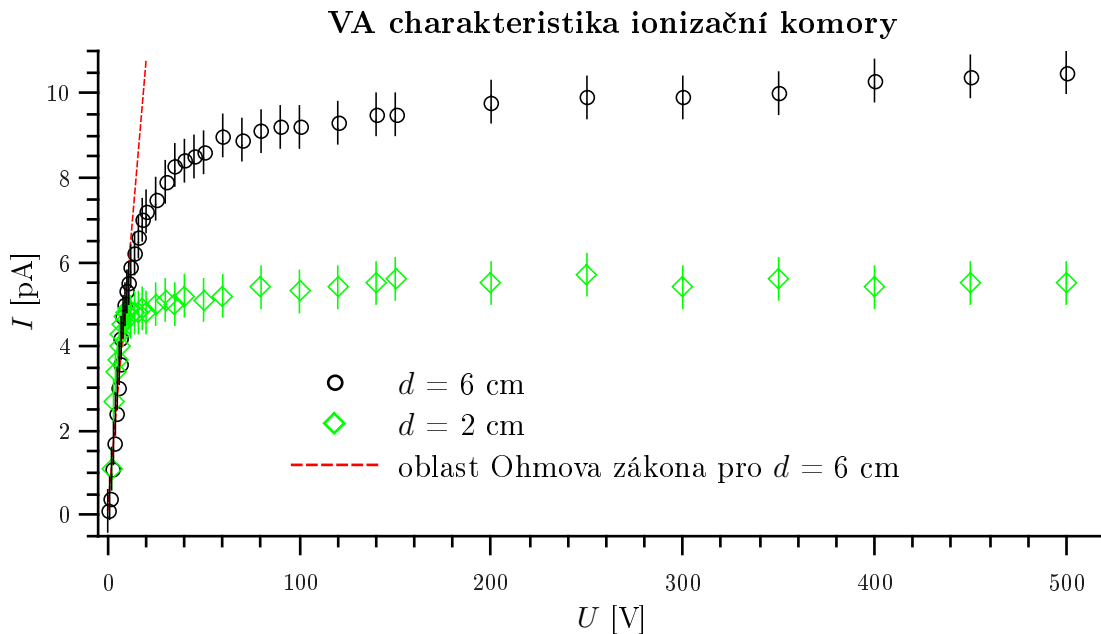
2 Výsledky měření

2.1 V-A charakteristika ionizační komory

Voltampérovou charakteristiku ionizační komory měřím pro dvě vzdálenosti elektrod d 2 a 6 cm. Uprostřed spodní elektrody je umístěn zářič ^{212}Po . Detekovaný proud odečítám na pikoampérmetru KEITHLEY 6487, který zároveň funguje jako regulovatelný zdroj přiloženého vnějšího napětí. Výsledky měření v tabulce 1 a v grafu na obr. 2. Při nastaveném rozsahu ampérmetru 2 nA činí chyba dle [2] $\pm 0.3\% + 0.4$ pA. Vzhledem k velikosti detekovaného proudu a skutečnosti, že ten nebyl jednoduše stálý, ale přeskakoval v přibližném intervalu ± 0.5 pA, beru chybu právě 0.5 pA.

$d = 6$ cm						$d = 2$ cm					
U [V]	I [pA]	U [V]	I [pA]	U [V]	I [pA]	U [V]	I [pA]	U [V]	I [pA]	U [V]	I [pA]
0	0.1	14	6.2	90	9.2	0	–	12	4.7	120	5.4
1	0.4	16	6.6	100	9.2	1	–	14	4.8	140	5.5
2	1.1	18	7.0	120	9.3	2	1.1	16	4.8	150	5.6
3	1.7	20	7.2	140	9.5	3	2.7	18	4.9	200	5.5
4	2.4	25	7.5	150	9.5	4	3.4	20	4.8	250	5.7
5	3.0	30	7.9	200	9.8	5	3.7	25	5.0	300	5.4
6	3.6	35	8.3	250	9.9	6	4.0	30	5.1	350	5.6
7	4.2	40	8.4	300	9.9	7	4.3	35	5.0	400	5.4
8	4.7	45	8.5	350	10.0	8	4.5	40	5.2	450	5.5
9	5.0	50	8.6	400	10.3	9	4.7	60	5.2	500	5.5
10	5.3	60	9.0	450	10.4	10	4.8	80	5.4	–	–
11	5.5	70	8.9	500	10.5	11	4.9	100	5.3	–	–
12	5.9	80	9.1	–	–						

Tabulka 1: Vlevo: Zvolené vnější napětí U na elektrodách komory a odpovídající detekovaný proud I při vzdálenosti elektrod $d = 6$ cm. Vpravo: Při vzdálenosti $d = 2$ cm.



Obr. 2: Graf V-A charakteristiky ionizační komory pro napětí 0 až 500 V.

2.2 Charakteristické oblasti charakteristiky

Při pohledu na graf na obr. 2 lze jednoduše identifikovat jednotlivé oblasti V-A charakteristiky popsané výše. Oblast Ohmova zákona pro vzdálenost elektrod $d = 6$ cm jsem demonstrativně proložil lin. fcí. Oblast nasyceného proudu je jasně zřetelná od napětí cca 50 V.

2.3 Svodový proud

Svodový proud měřím při optimální vzdálenosti elektrod $d = 6$ cm. Pro všechna napětí 0, 100, 200, 300, 400, 500 V se tento pohybuje v řádu jednotek setin (maximálně asi 1 desetiny) pA, tedy vzhledem k chybě a jinak měřeným proudům je prakticky zanedbatelný.

2.4 Poměr aktivit zářičů a odhad jejich absolutní velikosti

Jako zářič je použit vzorek ^{238}Pu . Jeho energie α -rozpadu jsou dle [4] 5.456 MeV (29 %) a 5.499 MeV (71 %). Střední energie vyletujících α tedy činí asi

$$\overline{T_0} = 5.487 \text{ MeV.}$$

Podle (2) můžeme stanovit jejich dolet ve vzduchu při normálních podmínkách jako

$$R \approx 4 \text{ cm.}$$

Z (1) s použitím předpokladu, že částice ztratí v detektoru veškerou svou energii ($\overline{\Delta T} = \overline{T_0}$), mohu spočítat V , množství částic vnikajících do oblasti detektoru za jednotku času. Přitom $I = (10.5 \pm 0.5)$ pA je ionizační proud při napětí 500 V na elektrodách a jejich vzdálenosti $d = 6$ cm, $E_i = 35$ eV a $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C:

$$V = \frac{IE_i}{e\overline{T_0}} = (419 \pm 20) \text{ s}^{-1}.$$

Zářič je položen doprostřed spodní elektrody. Pokud z něj vyletují α -částice izotropně, pak do komory jich vstupuje a k ionizačnímu proudu přispívá právě polovina. Skutečné množství emitovaných α za jednotku času a tedy i absolutní aktivita A zářiče tak činí asi

$$A = 2V = (838 \pm 40) \text{ Bq.}$$

Protože aktivita zářiče je přímo úměrná velikosti ionizačního proudu, poměr abs. aktivit dvou různých vzorků mohou získat jako

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{I_1}{I_2}, \quad (3)$$

kde $A_1 = A$ je aktivita a I_1 je již změřený ionizační proud prvního zářiče při zkoumání V-A charakteristiky detektoru, viz. výše. I_2 měřím při vhodných a hlavně stejných podmínkách jako I_1 , tzn. $U = 500$ V, $d = 6$ cm. Tedy $I_1 = I|_{500\text{V}, 6\text{cm}} = (10.5 \pm 0.5)$ pA a naměřené

$$I_2 = (0.9 \pm 0.5) \text{ pA.}$$

Poměr aktivit

$$A_1/A_2 = (12 \pm 7).$$

Pak

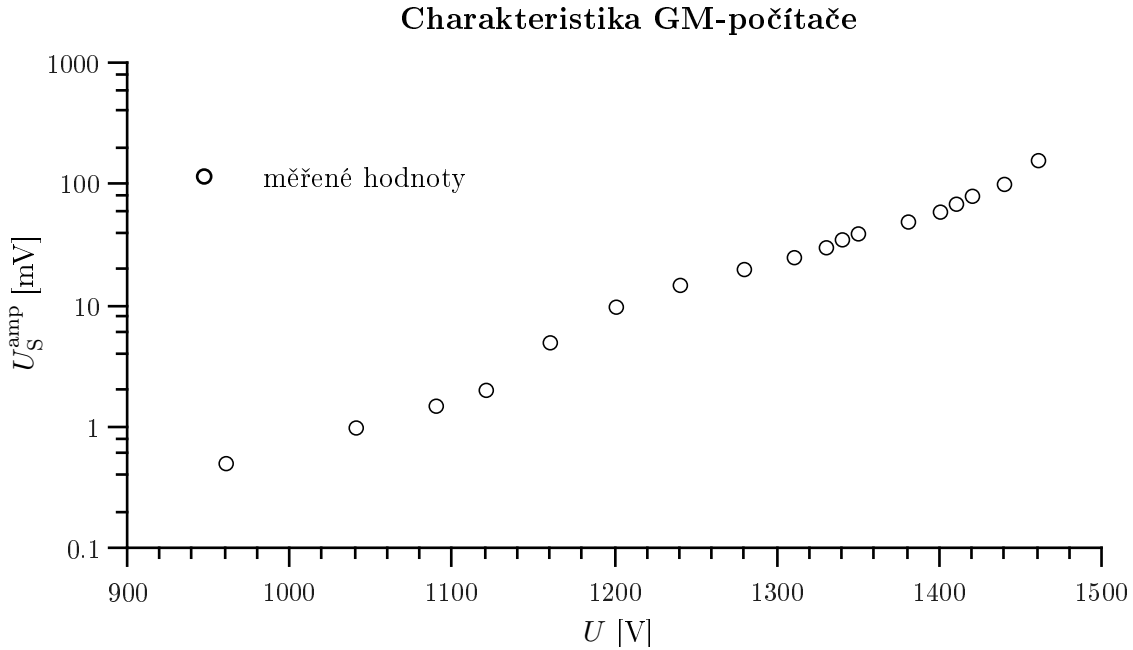
$$A_2 = (70 \pm 44) \text{ Bq.}$$

2.5 Amplituda impulsu Geigerova-Müllerova počítáče

Napěťový signál z Geigerova-Müllerova počítáče je přiveden na y -ovou osu oscilátoru, kde podle nastaveného rozsahu osy odečítáme velikost jeho amplitudy (tedy největší dosažené hodnoty). Před vstupní okénko byl umístěn radioaktivní vzorek, jako zdroj použit zdroj vysokého stab. napětí 0-2000 V NEMEC. Výsledky měření k nalezení v tabulce 2, závislost vynesena v grafu na obr. 3. Rozsah y -ové osy volím následovně: 0.5 mV/cm pro U do 1160 V, 5 mV/cm do 1350 V, 10 mV/cm do 1420 V, 20 mV/cm dále. Amplitudu odečítám z obrazovky osciloskopu s odhadovanou chybou max. 0.5 cm při amplitudách do 40 mV, 1 cm při vyšších, chyba není v grafu vynesena (kromě prvních dvou bodů jsou vybrané značky přibližně stejné velké).

U [V]	U_S^{amp} [mV]	U [V]	U_S^{amp} [mV]
960	0.5	1330	30
1040	1.0	1340	35
1090	1.5	1350	40
1120	2.0	1380	50
1160	5.0	1400	60
1200	10	1410	70
1240	15	1420	80
1280	20	1440	100
1310	25	1460	160

Tabulka 2: Vnější napětí přiložené k elektrodám GM-počítače U a amplituda napěťového signálu U_S^{amp} .



Obr. 3: Graf závislosti amplitudy napěťového impulsu GM-počítače na přiloženém napětí U .

3 Diskuse výsledků

Při proměňování V-A charakteristiky ionizační komory nelze přímo odečítat z pikoampérmetru ion. proud I , neboť ten se velice rychle mění (zvláště pro vyšší vnější napětí U), osciluje řádově okolo určitých hodnot (jak se kondenzátor střídavě vybíjí a nabíjí při dopadu nosičů náboje). Proto byl I určován jako střední hodnota intervalu, ve kterém se okamžitý údaj pohyboval, přičemž bylo nutné obezřetně vyloučit některé anomálie (jako např. proud se 10 s pohybuje v intervalu 9 až 10 pA, aby poté skočil na 7.5 pA a vzápětí na 13 pA, téměř okamžitě se však vrátí mezi 9 a 10 pA). Většinu času I setrval v rozmezí asi 1 pA, proto je jeho chyba odhadnuta jako 0.5 pA. Skoro všechny body charakteristik bylo nutné pozorovat delší dobu (v závislosti na intenzitě změn proudu) cca 20 až 30 sekund.

Pro první dvě hodnoty vnějšího napětí (0 a 1 V) při vzdálenosti $d = 2$ cm elektrod došlo buď k chybě, nebo byl proud velice nepatrný (ani opakovaně se mi nepodařilo prakticky nic naměřit, resp. proud byl pro obě U stejný, zanedbatelný, záporný, nebo naopak oscilující mezi kladnými a zápornými hodnotami), při zvýšení napětí na 2 V se ten skokově vyšplhal na 1.1 pA. Obě měření jsem ze záznamu vyloučil. Nic podobného nebylo při měření ve vzdálenosti desek 6 cm nebo svodového proudu pozorováno.

V grafu V-A charakteristiky na obr. 2 lze jasně odlišit oblast Ohmova zákona, náběh na plato charakteristiky a oblast nasyceného proudu. Ohmův zákon pro vzdálenost desek 6 cm lze použít do cca 11 V vnějšího napětí. Plato začíná okolo 50 až 60 V.

Protože střední energie α z rozpadu ^{238}Pu leží v rozmezí 4 až 7 MeV, je použití (2) při stanovení jejich doletu R korektní. Tento dolet (≈ 4 cm) je menší než vzájemná optimální vzdálenost elektrod detektoru $d = 6$ cm nebo

jejich poloměr cca 9 cm. Proto i předpoklad, že α -částice, které do detektoru vstoupí, zde zároveň s největší pravděpodobností ztratí veškerou svou energii, je správný.

Předpoklad izotropního vyzařování vzorku nebyl blíže ověřován. Zda ho můžeme považovat za bodový zdroj, záleží na konkrétním tvaru a velikosti vzorku (vzhledem k velikosti detektoru). Ten byl zataven v menší kruhové, placaté plastové obálce. Pokud je vzorek podobného tvaru jako obálka, pak vyzařuje spíše jako kosinový zářič, nicméně stále do oblasti detektoru vstupuje zhruba polovina všech částic z proběhlých rozpadů.

Na osciloskopu je vhodné měřit amplitudu nejintenzivnějších impulsů, ačkoli ty nemusí být vždy dostatečně jasné oproti těm menším, což generuje systematickou chybu (podhodnocení amplitudy). Zároveň fakt, že impulsy byly různé (roz. při jednom nastaveném napětí) naznačuje, že zkoumaná část ještě není v Geiger-Müllerově oblasti, kde by jejich amplituda měla být stejná.

Chybu, se kterou stanovuji velikost impulsů, odhaduji dle rozlišení a rozmezí, v němž se vrcholky impulsů pohybují (viz. výše).

4 Závěr

Byly změřeny V-A charakteristiky ionizační komory v rozsahu 0-500 V při vzdálenostech elektrod 2 a 6 cm, viz. tab. 1 a graf na obr. 2. V grafu byly identifikovány charakteristické oblasti Ohmova zákona a nasyceného proudu.

Byla měřena závislost svodového proudu na napětí 0-500 V při vzdálenosti elektrod 6 cm.

Byl stanoven přibližný dolet α -částic z rozpadu použitého zářiče ^{238}Pu

$$R \approx 4 \text{ cm,}$$

odhadnuta jeho absolutní aktivita

$$A = (838 \pm 40) \text{ Bq}$$

a změřen poměr aktivit tohoto a druhého zářiče, odhadnuta aktivita

$$A_2 = (70 \pm 44) \text{ Bq.}$$

Pomocí osciloskopu byla měřena závislost amplitudy el. impulsu Geigerova-Müllerova počítače, viz. tab. 2 a graf na obr. 3.

Výsledky byly zpracovány a grafy sestrojeny pomocí programu *QtiPlot 0.9.8.4*.

Reference

- [1] V. Vorobel: Studium plynových detektorů, 2003, http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/txt_402.pdf
- [2] KEITHLEY: Model 6487 Specification, <http://www.keithley.com/data?asset=10756>, 2012
- [3] D. Nosek, J. Vrzal: Spektrometrie záření α , 2003, http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/txt_405.pdf
- [4] Kaye & Laby: Tables of Physical & Chemical Constants, National Physical Laboratory, <http://www.kayelaby.npl.co.uk/toc/>, 2012