

12. STUDIUM GEIGEROVA-MÜLLEROVA POČÍTAČE PRO ZÁŘENÍ GAMA

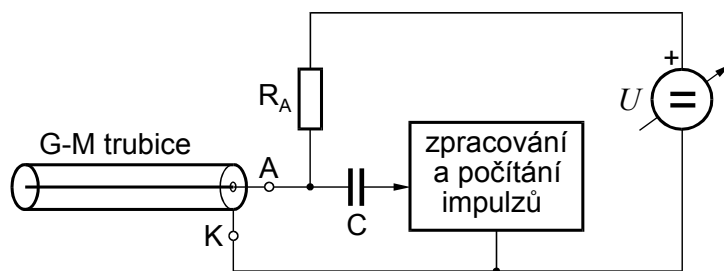
Měřicí potřeby:

- 1) přístroj pro měření radioaktivního záření ROBOTRON 20 046
- 2) Geigerův-Müllerův počítač pro záření gama
- 3) dva zářiče (^{60}Co) o přibližně stejné aktivitě
- 4) milimetrový papír (nutno si přinést vlastní)

Obecná část

Rozpad atomových jader radioaktivních látek se projevuje vysíláním částic alfa (jádro helia) nebo beta (elektron nebo pozitron), které bývá doprovázené vyzářením kvanta gama (foton elektromagnetického záření). Proud těchto částic se nazývá záření gama.

Asi nejjednodušším zařízením pro detekci radioaktivního záření je Geigerův-Müllerův počítač (dále jen G-M počítač). G-M počítač je tvořen dvěma elektrodami, na něž je přivedeno přes anodový odpor vysoké napětí 100 až 1000 V (obr. 1). Vnější elektroda, katoda (-), je tvořena válcem z kovu, nebo pokoveného



Obr. 1 Geigerův-Müllerův počítač

skla. Jeho středem prochází tenké kovové vlákno tvořící anodu (+). Celý systém je plněn většinou argonem o tlaku $13 \div 27$ kPa. Vysoké napětí na elektrodách vytvoří v plynovém objemu elektrické pole. Proletí-li plynem nabitá částice, ionizuje svými nárazy plyn – tvoří kladné

ionty a elektrony. Ionty a elektrony jsou přitahovány k opačně nabitým elektrodám. V důsledku velmi vysoké intenzity elektrického pole v oblasti tenké anody dojde k urychlování elektronů, které svými srážkami s atomy plynu způsobují další, tzv. sekundární ionizaci. Elektrony vzniklé touto lavinovou ionizací dopadnou na anodu a způsobí vznik krátkého proudového impulsu, jenž vytvoří úbytek napětí na anodovém odporu. Tento rychlý pokles a následný vzrůst napětí (řádově desítky voltů) je přenesen přes oddělovací kondenzátor, zesílen a zpracován elektronickými obvody jako **impulz**.

Množství iontů, které vytvoří prvotní nabitá částice je charakterizováno tzv. *plynovým zesílením* a bývá řádově 10^6 . Plynové zesílení závisí na velikosti napětí, rozměrech počítače, tlaku a druhu plynu. Bez dalších úprav by ovšem výboj trval dále, protože kladné ionty mohou při dopadu a neutralizaci vytrhnout elektron z katody, který se stane původcem další ionizace. Výboj by se tedy stále obnovoval až do zničení počítače a proto je nutno jej přerušit. Zhášení výboje se nejčastěji

realizuje tak, že se k náplni počítače (argon) přidají páry etylalkoholu. Ionizovaný argon se pak sráží s molekulami etylalkoholu, a protože ionizační potenciál argonu je 15,7 eV a etylalkoholu jen 11,3 eV, odeberou ionty argonu při srážce elektron molekulám etylalkoholu a neutralizují se. Alkoholové ionty pak doletí ke katodě, kde se rozloží (disociují), čímž se spotřebuje téměř všechna excitační energie a produkty rozkladu zůstanou v relativním klidu. Nevýhodou je však postupný rozklad molekul etylalkoholu a tím zhoršování kvality počítače.

Zhášení výboje je také možné provádět přidáním malého množství par halogenů (chlór, bróm, jód) k některému inertnímu plynu (neon, helium). Tyto halogenové prvky mají tu výhodu, že po disociaci jejich molekuly opět rekombinují a tím nedochází ke zhoršování kvality počítače. Nevýhodou halogenových počítačů je ovšem dlouhá doba při níž počítač neregistruje další kvanta gama (tzv. mrtvá doba) a silná koroze stěn počítače způsobená halogeny.

G-M počítač tak, jak byl popsán, může detekovat převážně nabitě částice, protože pravděpodobnost interakce kvanta gama s plynem je malá. Detekce záření gama (fotony vysokých energií) se proto uskutečňuje pomocí sekundárních částic (fotoelektronů, Comptonových elektronů, párů elektron–pozitron) vzniklých interakcí kvant gama s hmotou obalu G-M počítače. Je nutné, aby ve stěnách počítače bylo pohlceno co nejvíce kvant gama. Proto se trubice počítačů pro detekci záření gama zhotovují z materiálů s vysokým atomovým číslem Z a s relativně silnými stěnami. Přesto je jejich účinnost velmi malá (1–2 %), protože pravděpodobnost interakce kvanta gama s hmotou je malá.

Na závěr nutno uvést, že G-M počítačem, pokud je provozován v oblasti plata charakteristiky (viz níže), nelze identifikovat druh částice ani stanovit její energii, protože velikost impulzu nezávisí na charakteru primární ionizace.

Statistický charakter jevů v jaderné fyzice

Většina jevů v jaderné fyzice má statistický charakter. Na rozdíl od makrofyziky, kde se předpokládá, že hodnoty makroskopických veličin jsou určité a fluktuace (odchylky), které se objeví, jsou způsobeny nedokonalostí přístrojů či nedokonalými podmínkami měření, souvisejí obvykle fluktuace měřených veličin v jaderné fyzice přímo s podstatou měřeného procesu. Oproti makrofyzice je zde naopak možno považovat měřící přístroje za ideální a fluktuace za dané charakterem měřené veličiny. Například zákon radioaktivního rozpadu má statistický charakter. Je-li aktivita nějakého zářiče A rozpadů/sec, pak to **neznamená**, že se každou sekundu rozpadne přesně A jader. Za sekundu se rozpadá A jader pouze **průměrně** a existuje konečná pravděpodobnost, že se rozpadne i jiný počet jader.

Zákon, kterým se řídí fluktuace v četnosti naměřeného počtu částic je tzv. *Poissonovo rozdělení*. Pravděpodobnost $P(n)$, že naměříme za nějakou dobu t dopad n částic je dána vztahem:

$$P(n) = \frac{(\bar{n})^n}{n!} e^{-\bar{n}}, \quad (1)$$

kde \bar{n} je průměrný (střední) počet částic dopadajících za tuto dobu. Je zřejmé, že

$$\bar{n} = \sum_{n=0}^{\infty} n \cdot P(n). \quad (2)$$

Jak je patrné, pravděpodobnost dopadu n částic je nenulová i pro $n \neq \bar{n}$. Obr. 2 znázorňuje Poissonovo rozdělení pro $\bar{n} = 3,5$. Rozptyl Poissonova rozdělení je dán střední hodnotou čtverců odchylek, a lze dokázat, že je roven právě \bar{n} :

$$\sigma^2 = \overline{(n - \bar{n})^2} = \bar{n}. \quad (3)$$

Je-li střední počet naměřených částic dostatečně velký ($\bar{n} > 9$), splývá prakticky Poissonovo rozdělení s rozdělením Gaussovým, které má rozptyl stejné velikosti. Z teorie chyb měření víme, že směrodatná chyba (nazývaná též střední kvadratická) jednoho konkrétního měření je dána odmocninou z rozptylu. Naměříme-li tedy počet částic n , bude směrodatná chyba tohoto měření:

$$\sigma = \sqrt{\bar{n}} \approx \sqrt{n}. \quad (4)$$

Skutečná střední hodnota \bar{n} , kterou bychom získali z nekonečně mnoha měření, není pochopitelně známa, proto se přibližně předpokládá, že je rovna n .

Výsledek měření počtu částic za dobu t se proto udává ve tvaru:

$$n \pm \sqrt{n}. \quad (5)$$

Četnost, tj. počet dopadů částic za jednotku času, bude pak:

$$N = \frac{n}{t} \pm \frac{\sqrt{n}}{t}. \quad (6)$$

Význam vztahů je tento: bude-li výsledkem jednoho měření hodnota n , pak střední hodnota \bar{n} leží v mezích $n \pm \sqrt{n}$ s pravděpodobností 68,3 %. Kdybychom tedy provedli velmi mnoho měření n_1, n_2, \dots, n_k , pak 68,3 % těchto měření bude ležet v

mezích $\bar{n} \pm \sqrt{\bar{n}}$, kde $\bar{n} \approx \frac{\sum_{i=1}^k n_i}{k}$.

Vypočteme-li relativní směrodatnou chybu našeho měření

$$\xi_n = \frac{\sqrt{n}}{n} = \frac{1}{\sqrt{n}}, \quad (7)$$

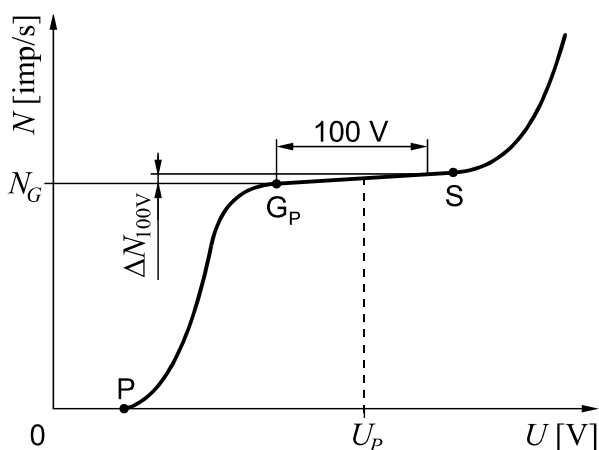
zjistíme, že klesá s rostoucím počtem naměřených částic. Chceme-li tedy zpřesnit měření, musíme naměřit větší počet částic a měřit proto delší dobu.

Parametry G-M počítačů

Abychom mohli s daným G-M počítačem měřit, musíme znát jeho základní parametry. Jsou to: charakteristika, rozlišovací doba a účinnost.

A. Charakteristika

Charakteristika je závislost četnosti naměřených impulzů na napětí vloženém na počítač (obr. 3). Při napětí daném polohou bodu P začínáme registrovat první impulzy.



Obr. 3 Charakteristika G-M počítače

$$\text{Sklon plata} = \frac{\Delta N_{100V}}{N_G} \cdot 100 \text{ [%/100V]}$$

Při tomto napětí závisí velikost impulzů na energii částic, dochází jen ke slabé lavinové ionizaci a impulzy jsou poměrně malé. Registrovány jsou proto jen největší z nich. Poloha bodu P závisí kromě jiného na nastavení diskriminační úrovně U_d . S rostoucím napětím roste rozsah lavinové ionizace, takže roste i velikost impulzů. Roste tedy i počet zaregistrovaných impulzů. Velikost impulzu je ale stále závislá na energii částice (resp. energii, kterou ionizující částice v počítači ztratila). Tato závislost však postupně mizí, až v místě Geigerova prahu G_p jsou již

velikosti všech impulzů konstantní (nezávislé na energii částic) a všechny impulzy jsou registrovány. V oblasti od G_p do S je četnost prakticky konstantní a této části charakteristiky se říká *plošina* nebo *plato*. U dobrého počítače je jeho délka alespoň 100 V. Plato má i v této oblasti mírný sklon, způsobený nedokonalým zhášením výboje. Sklon je udáván jako přírůstek četnosti impulzů v procentech na úseku 100 V. Velikost a sklon plata závisí na konstrukci a stavu náplně počítače. U dobrého počítače by měl mít velikost max. 0,1 %/100V. Při dalším zvyšování napětí za bod S již dochází k nedostatečnému zhášení, roste počet sekundárních výbojů, které vedou k trvalému výboji v počítači a k jeho zničení.

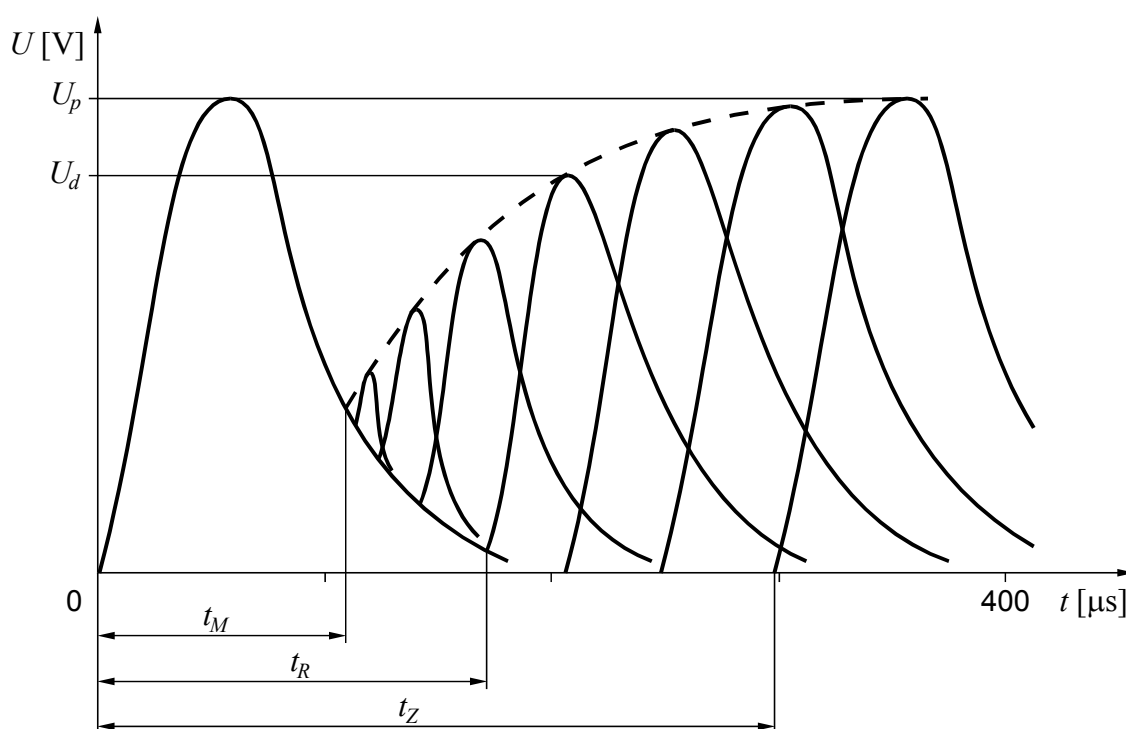
Každý G-M počítač má trochu jiný tvar charakteristiky, který se mění také jeho stářím. Před měřením je proto vždy nutné charakteristiku zjistit. Pracovní napětí G-M počítače U_p se volí pak asi v 1/3 až 1/2 od začátku plošiny.

B. Rozlišovací doba

Je třeba ji znát zvláště při měření vyšších aktivit. Dojde-li v počítači po dopadu částice k výboji, trvá tento výboj po jistou dobu. Dopadnou-li během této doby další částice, nejsou zaregistrovány. V důsledku tohoto jevu dochází ke ztrátám

impulzů, které bychom jinak zaregistrovali, kdyby počítač tuto dobu necitlivosti neměl.

Na obr. 4 je plnou čarou zakreslen průběh napětí záporných impulzů na anodě G-M počítače. Během mrtvé doby t_M není žádná další částice schopna vyvolat odezvu, protože prostorový náboj těžkých (a proto pomalých) kladných iontů snižuje elektrické pole v blízkosti anody, a nemůže tak dojít k sekundární ionizaci. Jak oblak iontů pomalu postupuje ke katodě, elektrické pole se obnovuje



Obr. 4 Záporné impulzy na anodě. Čárkovaně znázorněna změna velikosti impulzu v závislosti na době jeho vzniku po předchozím impulzu.

a další dopadlá částice již může vyvolat výboj – impulz bude však malý. Velikost impulzu závisí na době mezi dopady částic. Původní, plnou velikost může mít následující impulz teprve tehdy, dopadne-li částice až po uplynutí zotavovací doby t_Z . Po této době je počítač plně zregenerován. Mrtvá doba t_M bývá řádově kolem $100 \mu\text{s}$.

Konečně rozlišovací doba t_R je doba od počátku impulzu až do okamžiku, kdy registrační zařízení, vyžadující určité minimální napětí impulzu U_d , opět dovoluje započítat další impulz. Tato doba je závislá na požadavcích experimentátora a lze ji zvolit pomocí diskriminační úrovně U_d , určující minimální velikost impulzu nutnou pro registraci. Zvolíme-li tuto hladinu příliš nízkou, zkrátí se sice doba t_R , ale zhorší se kvalita pulzů (budou se registrovat i pulzy slabé, případně šum).

Kdyby G-M počítač mrtvou dobu neměl, byl by střední počet zaregistrovaných částic (impulzů) za jednu sekundu D . Ve skutečnosti je počet registrovaných impulzů za sekundu R (menší). Každému registrovanému pulzu

odpovídá jedna rozlišovací doba t_R . Celková doba, kdy byl počítač necitlivý, je pak Rt_R . Střední počet částic, které nebyly po tuto dobu registrovány (ztráta impulzů) je proto DRt_R . To je ovšem rovno $D - R$ a tak dostáváme rovnici:

$$D - R = RDt_R . \quad (8)$$

Vyjádríme-li D , dostaneme:

$$D = \frac{R}{1 - Rt_R} . \quad (9)$$

Ze 3 vystupujících proměnných zde známe pouze jednu: R , které měříme G-M počítačem. Abychom mohli vypočítat t_R , použijeme tzv. *metody dvou zářičů*. Metoda spočívá ve srovnání součtu aktivit dvou samostatně měřených (přibližně stejných) zářičů s aktivitou těchto zářičů měřených dohromady. Aktivita společně měřených zářičů bude menší, protože je větší relativní ztráta impulzů.

Je třeba si ještě uvědomit, že na G-M počítač neustále dopadají částice pocházející z kosmického záření a stop radioaktivních látek ve vzduchu, stínění i v materiálu samotného počítače. Tento dopad částic se nazývá *pozadí*. Pro dopady z pozadí platí rovněž vztah (8):

$$D_0 - R_0 = R_0 D_0 t_R \quad (10)$$

Vlastní měření probíhá takto:

- a) Změříme počet impulzů R_0 bez zářičů, tj. pozadí.
- b) Umístíme do první misky ke G-M počítači zářič č. 1. Změříme tím počet impulzů R_{01} od pozadí a prvního zářiče. Ideální počítač bez mrtvé doby by registroval součet impulzů od zářiče D_1 a z pozadí D_0 . Analogicky podle vztahu (8) bude platit:

$$D_0 + D_1 - R_{01} = R_{01}(D_0 + D_1)t_R . \quad (11)$$

- c) Do druhé misky přidáme zářič č. 2 a změříme četnost impulzů způsobených dopadem částic z obou zářičů a pozadí současně. Dostaneme obdobně:

$$D_0 + D_1 + D_2 - R_{012} = R_{012}(D_0 + D_1 + D_2)t_R \quad (12)$$

- d) Nakonec odebereme zářič č. 1 a dostaneme rovnici:

$$D_0 + D_2 - R_{02} = R_{02}(D_0 + D_2)t_R \quad (13)$$

Dostáváme takto soustavu čtyř rovnic (10), (11), (12) a (13). Řešení soustavy vede na kvadratickou rovnici pro rozlišovací dobu t_R . Po zjednodušení jejího přesného řešení (rozvojem pomocí mocnin $x = R_{01} + R_{02} - R_{012} - R_0$) získáme přibližný vztah:

$$t_R = t \left[1 + \frac{t}{2}(R_{012} - R_0) \right], \quad \text{kde } t = \frac{R_{01} + R_{02} - R_{012} - R_0}{2(R_{01} - R_0)(R_{02} - R_0)} \quad (14)$$

Protože je hodnota výrazu $R_{01} + R_{02} - R_{012} - R_0$ velmi malá, je nutno měřit R_{01} , R_{02} a R_{012} dostatečně dlouho (několik minut), abychom dosáhli dostatečné přesnosti.

Budeme-li znát rozlišovací dobu G-M počítače, můžeme při běžném měření provádět korekci měřených hodnot podle vztahu (9). Vliv rozlišovací doby se začíná projevovat při počítacích rychlostech nad 1000 impulzů/min. Pak musíme

korekci provádět vždy. Metoda dvou zářičů je ovšem použitelná pouze v oboru, kdy ztráty registrovaných impulzů díky zdvojení zářičů nepřevyšují 10 %. Je zřejmé, že použití G-M počítače pro měření velkých aktivit záření je omezeno, protože s rostoucí počítací rychlostí se zhoršuje přesnost určení D ze vztahu (9). Dodejme, že mrtvou, rozlišovací a zotavovací dobu lze také změřit přímo osciloskopem.

C. Účinnost G-M počítače

Účinnost počítače je dána poměrem počtu částic, které počítač zaregistroval (R) k celkovému počtu částic, které na počítač dopadly (N). Počet dopadlých částic lze stanovit z aktivity zářiče pomocí zákona radioaktivní přeměny:

$$A = A_0 e^{-\lambda t}, \quad (15)$$

kde A_0 je počáteční aktivita, $\lambda = \ln 2 / T$ je rozpadová konstanta, t je čas ve dnech a T je poločas rozpadu ve dnech. Aktivita je počet rozpadů radioaktivních jader za sekundu a její jednotkou je becquerel (Bq). Počáteční aktivita je stanovena u etalonů záření přesně k určitému dni a je uvedena na certifikátu. Ze vztahu (15) je vidět, že se aktivita s časem snižuje, protože počet ještě nerozpadlých atomů v zářiči klesá.

Celkový počet kvant gama všech energií, které zářič emituje za jednotku času, se vypočte jako $A \cdot (a_1 + a_2 + \dots + a_n)$, kde a_n jsou tzv. *výtěžnosti*. Výtěžnost udává počet kvant gama dané energie vzniklých při **jednom** rozpadu a je zapsána v tabulce radioaktivních prvků vždy v závorce za příslušnou energii (tabulka je na konci skript).

Zářič emituje kvanta gama do celého prostoru. Na počítač však dopadne pouze část letící do prostorového úhlu, jenž je vymezen plochou počítače. Zavádí se proto *geometrický faktor* g , jako poměr prostorového úhlu vymezeného plochou detektoru k celému prostorovému úhlu 4π .

Výsledný vztah pro účinnost počítače bude tedy:

$$f = \frac{R}{N} \cdot 100 = \frac{R}{A(a_1 + a_2 + \dots + a_n) \cdot g} \cdot 100 \quad [\%] \quad (16)$$

Do vztahu musíme dosazovat četnost registrovaných impulzů pocházejících pouze od zářiče. **Proto je třeba před dosazením odečíst od naměřené hodnoty pozadí!**

Výpočet geometrického faktoru obdélníkové plochy G-M počítače je poměrně složitý, proto jej neuvádíme. Jeho vypočtená hodnota pro různé vzdálenosti zářič–počítač je k dispozici na tabuli u úlohy.

Na závěr nutno uvést, že rozlišovací doba, charakteristika a účinnost jsou parametry, které se určují též u jiných druhů detektorů radioaktivního záření – porpocionálních počítačů, scintilačních počítačů, polovodičových detektorů aj.

Měření

Měření budete provádět na přístroji, jehož ovládání a popis najdete přiložen u úlohy. Zářiče mají tvar kruhové průhledné destičky, kde uvnitř je zalisován vlastní

radioaktivní materiál. Zářiče vkládejte do misek ve stojánku G-M trubice tak, aby byly obráceny zdrojem záření k trubici. Misky mají na dně otvor pro snadné vyjímání zářičů. Střed mezi miskami musí být pod středem trubice a misky musí být s trubicí rovnoběžně. Vzdálenost středu trubice od zářičů lze odečíst na stojanu. Se zářiči manipulujte zásadně pomocí kleští, neberte je do ruky! Olověný kontejner se zářiči nedávejte na stůl, nechte jej stát na zemi!! G-M trubicí se zářiči ponechte během měření uvnitř olověného stínění. Manipulaci provádějte při vypnutém napětí na počítači.

A. Charakteristika

Před zapnutím vysokého napětí nejprve nastavíme jeho regulační potenciometr na nulu. Do misky u G-M trubice vložíme slabý zářič a při postupně zvyšovaném napětí měříme po určitou dobu počty registrovaných impulzů. Naměřené hodnoty ihned převádíme na četnosti (počty za jednotku času) a vynášíme v závislosti na napětí do grafu. Jakmile zjistíme že měřená četnost začíná prudce růst (tj. pohybujeme se v oblasti **za** bodem **S** charakteristiky) ukončíme měření. **Při dalším zvyšování napětí hrozí zničení počítače!**

B. Rozlišovací doba

Pro měření použijeme dvou zářičů ^{60}Co o přibližně stejné aktivitě. Jsou označeny čísly. Momentálně nepoužívané zářiče je třeba ponechat v olověném kontejneru (na zemi!) ve vzdálenosti minimálně dva metry od trubice. Pracovní napětí G-M počítače se volí v 1/2 plata charakteristiky.

Pracovní úkol

- 1) Proměřte charakteristiku G-M počítače.
Měření provádějte podle pokynů přiložených u úlohy. Napětí, kdy počítač začne registrovat první impulzy (bod **P**) najděte přesně. Množství napočítaných impulzů (a tedy dobu měření) volte tak, aby byla relativní směrodatná chyba měření nejvýše 0,05. Neměřte ale déle než 100 s. Do grafu vyznačte pomocí úseček směrodatné chyby naměřených četností a významné body charakteristiky. Stanovte sklon plata charakteristiky a zhodnoťte kvalitu počítače.
- 2) Pro vhodně zvolené pracovní napětí určete rozlišovací dobu G-M počítače metodou dvou zářičů. Jednotlivá měření provádějte po dobu 200 s. Určete na základě vztahu (9) ztrátu impulzů, která nastala při měření obou zářičů dohromady a posuďte, zda použití této metody je v tomto případě korektní.
- 3) Vypočítejte účinnost G-M počítače pro záření gama. K výpočtu použijte četnosti impulzů pro jeden zářič z předcházejícího měření. Aktivity zářičů a geometrický faktor jsou uvedeny na tabuli u úlohy.