

PRAKTIKUM IZ MODERNE FIZIKE -
NUKLEARNA FIZIKA

Radioaktivnost u kaliju

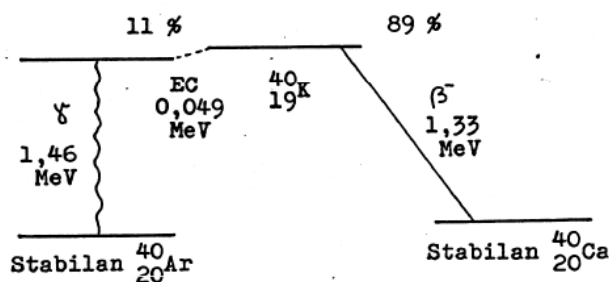
Prirodoslovno-matematički fakultet
Fizički odsjek

Zagreb, 2019

1 Radioaktivnost prirodnog kalija

Prirodni kalij sastoji se od tri izotopa: ^{39}K (93.08%), ^{40}K (0.0119%) i ^{41}K (6.91%). Od njih je samo ^{40}K radioaktivan te se u 89% slučajeva raspada β^- raspadom u stabilni ^{40}Ca , a u 11% slučajeva događa se uhvat elektrona te potom gama raspad u stabilni ^{40}Ar (Slika 1).

Radioaktivnost kalija (kasnije pripisanu ^{40}K) otkrio je Thomson 1905. g., a vrijeme poluraspada ^{40}K iznosi $T_{1/2} = 1.15 \cdot 10^9$ godina. Upravo mu je dugo vrijeme poluraspada omogućilo da se zadrži još od nukleosinteze iz doba nastanka Zemlje. Kalij je vrlo rasprostranjen u prirodi, pa ga nalazimo u zemlji, morskoj vodi i živim organizmima. U ljudskom tijelu nalazi se težinski oko 0.2% K te je on i odgovoran za velik dio prirodne radioaktivnosti kojoj je izloženo ljudsko tijelo. U laboratorijima radioaktivni kalij uzrokuje šum brojača, zbog raspadanja u zidovima, podovima ili namještaju.

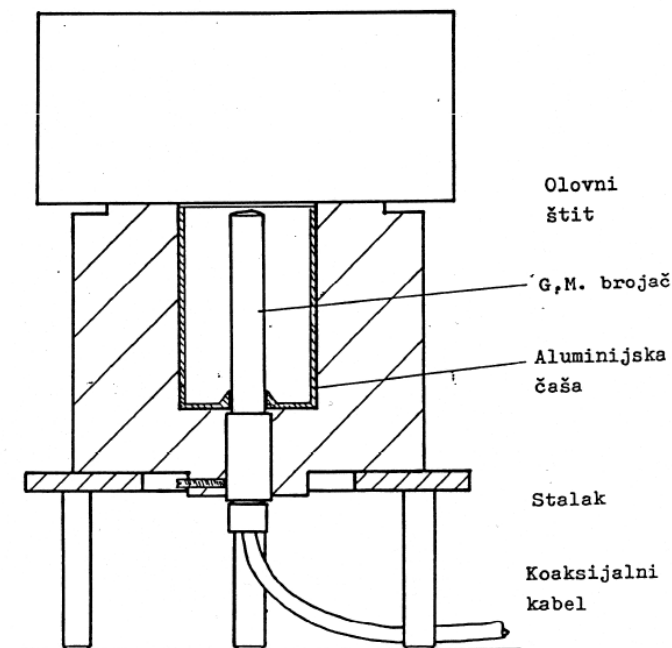


Slika 1: Shema raspada ^{40}K .

2 Eksperimentalni postav

Za vrlo precizna mjerenja apsolutne aktivnosti uzorka potrebni su detektori koji pokrivaju čitav prostorni kut (4π). U ovoj vježbi mjerit će se aktivnost kalija iz KCl-a, pomoću Geiger-Muellerovog (G.M.) brojača (Slika 2). G.M. brojač je cilindričnog oblika, sa tankom stijenkom (0.2 mm) od nerđajućeg čelika i prikladan je za opažanje β^- -čestica. Brojač je smješten u olovni štit, unutar kojeg se nalazi aluminijska čašica u koju se stavlja uzorak.

Opis rada G.M. brojača dan je u dodatku, te ga treba detaljno proučiti.



Slika 2: Skica eksperimentalnog postava.

3 Određivanje aktivnosti uzorka

U gore opisanom ekperimentalnom postavu radi se o određivanju aktivnosti "debelog" preparata s relativno niskom specifičnom aktivnosti. Pri tome stoga treba načiniti korekcije koje uzimaju u obzir samoapsorpciju zračenja u uzorku, u stijenkama detektora, kao i višestruka raspršenja.

Sam G.M. brojač ima efikasnost od gotovo 100% za opažanje β -čestica koje dođu u njegov aktivni volumen, pri tome se protpostavlja da je za uzorke niskih aktivnosti gubitak efikasnosti zbog mrtvog vremena brojača zanemari-
riv. Ako je, gledano iz smjera uorka, prostorni kut koji brojač pokriva jednak Ω , onda je broj impulsa koji on registrira jednak $\Omega/4\pi$ puta broj stvarnih emisija iz uzorka. No dio čestica se apsorbira u stijenci brojača, a faktor apsorpcije iznosi:

$$k = e^{-\mu d} \quad (1)$$

gdje je μ linearni koeficijent atenuacije elektrona, a d je debljina stijenke.

Do apsorpcije β -čestica dolazi i u samom preparatu, no broj čestica koje dolaze do brojača ovisi o nekoliko faktora. S jedne strane, zbog višestrukih raspršenja u uzorku, neke čestice, koje inicijalno nisu emitirane prema detektora, će biti usmjerene prema detektoru, što povećava taj broj. S druge

strane zbog debljine uzorka dolazi do apsorpcije dijela čestica, što smanjuje njihov broj u detektoru.

Pretpostavimo da je u preparatu jednoliko raspoređeno n atoma radionuklida, s konstantom raspada λ . Ako je vjerojatnost da se pojedini atom raspadne upravo β^- -raspadom dana sa P_i onda je broj raspada u jedinici vremena dan sa $n\lambda P_i$. Od toga samo dio čestica dolazi do brojača: faktor smanjenja zbog prostornog kuta je $\Omega/4\pi$, faktor smanjenja zbog samoapsorpcije je $1/\mu_i^u D$, a faktor smanjenja zbog atenuacije u stijenki brojača je $e^{-\mu_i^b d}$. Pri tome su $\mu_i^{u,b}$ linearni koeficijent atenuacije za elektrone energije E_i u uzorku odnosno brojaču, D je debljina uzorka, a d je debljina stijenke brojača. Broj impulsa koje će brojač zabilježiti u jedinici vremena će biti dan sa:

$$\frac{dN}{dt} = n\lambda \frac{\Omega}{4\pi} \frac{P_i}{\mu_i^u D} e^{-\mu_i^b d} \equiv n\lambda F \quad (2)$$

gdje je F :

$$F = \frac{S}{M} \frac{\Omega}{4\pi} \frac{P_i}{\mu_{\rho u}} e^{-\mu_{\rho b} d}. \quad (3)$$

Pri tome je S ploština preparata okrenuta prema brojaču, M je ukupna masa uzorka, a $\mu_{\rho} = \mu/\rho$. Treba imati na umu da je ovo aproksimacija koja se odnosi samo na elektrone jedne energije, dok u stvarnosti elektroni emitirani u β -raspadu mogu poprimiti spektar energija. Za ^{40}K je vjerojatnost β -raspada $P_i = 89\%$, s maksimalnom energijom elektrona $E_{max} = 1.31$ MeV te srednjom energijom $E_{sr} = 0.56$ MeV. Osim toga pri svakom raspršenju u uzorku smanjuje se kinetička energija elektrona, odn. apsorpcijski koeficijent raste. Može se aproksimativno uzeti da je srednji maseni koeficijent apsorpcije za elektrone s $E_{max} = 1.31$ jednak $\mu_{\rho} = 13.0$ cm²/g.

4 Zadaci

1. Određivanje karakteristike GM brojača
 - (a) Uključite glavnu sklopku na uređaju te zatim sklopku napona.
 - (b) Postaviti slab radioaktivni izvor unutar štita kraj detektora (isključivo nastavnik rukuje s izvorima).
 - (c) Mjeriti broj događaja u jedinici vremena u ovisnosti o naponu, u koracima od 20V u području 800 V do 1200 V.
 - (d) Skicirati broj događaja u jedinici vremena u ovisnosti o naponu i odrediti plato. (U izvješću je potrebno isto precizno nacrtati uključivo s pogrešakama).
2. Mjerenje aktivnosti KCl-a
 - (a) Postaviti napon na brojaču na sredinu platoa.
 - (b) Izmjeriti šum brojača u trajanju od 30 min.
 - (c) Usipati sol u čašicu oko brojača i mjeriti broj događaja u 30 min.
 - (d) Maknuti sol i očistiti brojač, te ponovo mjeriti šum u trajanju od 30 min.
3. Određivanje vremena poluraspada ^{40}K

Na temelju relacija 2 i 3, te poznatog atomskog udjela ^{40}K u prirodnom kaliju, odredite vrijeme poluraspada ovog izotopa. Pri tome treba ocijeniti prostorni kut Ω .

GEIGER-MULLEROV BROJAČ

Ionizacija plinova upotrebljava se od samih početaka istraživanja radioaktivnosti za detekciju nuklearnog zračenja. Nuklearne čestice najčešće imaju tako visoke energije da mogu proizvesti velik broj iona u plinu, pa je njihovo opažanje relativno lako. Pored razvoja mnogih novih metoda i danas nalazimo niz metoda detekcije zračenja koje su zasnovane na ionizaciji plinova, zbog niza pogodnosti u radu s plinovima.

Ionizacijske komore, elektroskopi i slični uređaji upotrebljavali su se mnogo ranije u drugim istraživanjima u fizici. Stari elektrometri imali su vrlo visoku osjetljivost i u njima su se mogle opažati vrlo male količine elektriciteta. Osjetljivost im ipak nije bila dovoljna da bi se pomoću njih mogla opažati ionizacija od pojedinačne nuklearne čestice. Tek iza Drugog svjetskog rata, s razvojem niskošumnih pojačala i impulsne elektronike, razvijene su i "impulsne" ionizacijske komore.

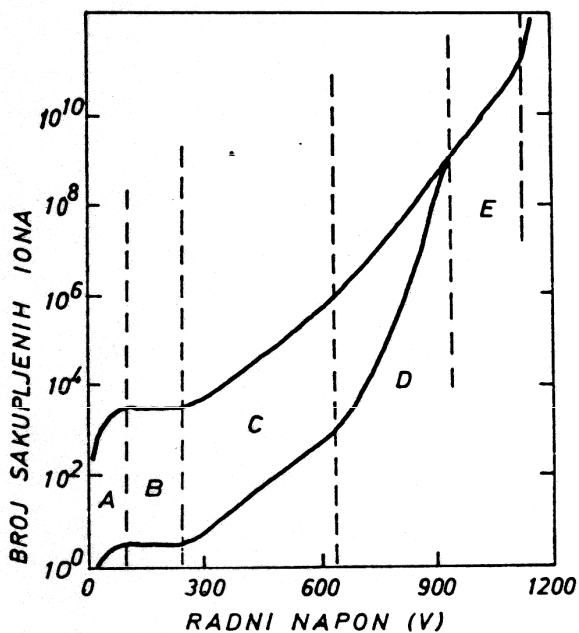
Spintariskop, fotografska emulzija, Wilsonova komora i komore s multiplikacijom ionizacije procesima sekundarne ionizacije su prve metode opažanja pojedinačnih čestica. Posljednju metodu primijenili su Rutherford i Geiger 1908., ali ona ostaje malo zapažena zbog nesigurnosti u radu. Geiger i Müller razvili su 1928. brojač, u kojemu se također primjenjuje pojačanje električkog impulsa sekundarnom ionizacijom plina. To je dobro poznati i vrlo pouzdani G.M.brojač kojeg, kao i ionizacijske komore, i danas često nalazimo u mjerenjima. Vrlo slična metoda detekcije je proporcionalan brojač.

IZVEDBA I SVOJSTVA G.M. BROJAČA

Opažanje ionizacije plina vrši se sakupljanjem iona i elektrona na dvjema elektrodama koje su na različitom električnom potencijalu. Pod djelovanjem električnog polja pozitivni ioni kreću se prema negativnoj elektrodi (katodi), a negativni ioni i elektroni k anodi. Elektroni se u plinovima gibaju oko sto puta brže od iona za jednak omjer električnog polja i tlaka plina. Brzo sabiranje elektrona primjenjuje se da bi se postigao bolji rad i da bi se izbjegla rekombinacija. Također se u plinskim detektorima najčešće upotrebljavaju plinovi koji imaju slabu tendenciju stvaranja negativnih iona.

U G.M. brojaču raspodjela električnog polja podešena je tako da je u neposrednoj blizini anode snažno električno polje. Najčešća izvedba je

cilindrična. Katoda je od metalnog lima u vidu plašta valjka, a duž njene osi postavljena je anoda od tanke metalne žice. Oko njih u zatvorenoj posudi nalazi se "brojački" plin na tlaku od oko 10 do 100 kPa. Najčešće se brojači pune argonom u koji se dodaje oko 5% organskih para (etilnog alkohola) ili halogenih elemenata (broma). Proporcionalni brojači imaju vrlo sličnu izvedbu elektroda, ali im je brojački plin obično drugog sastava, bez dodatka organskih para odnosno halogenih elemenata. Ionizacijske komore su



Sl.1. Amplitude impulsa iz G.M. brojača u ovisnosti o naponu za dvije početne ionizacije omjera oko 100. Područja rada su: A - djelomično sakupljanje iona zbog rekombinacije, B - potpuno sakupljanje, C - područje proporcionalnosti, D - područje djelomične proporcionalnosti, E - područje rada G.M. brojača (neovisnost amplitude impulsa o početnoj ionizaciji)

vrlo različitih izvedbi. Koncentracija električnog polja oko anode u ionizacijskim komorama nije potrebna, jer se proces sekundarne ionizacije ne primjenjuje. Osim u posebnim primjenama ne postavljaju se uvjeti na plinsko punjenje komora, pa su često i otvorene, a "brojački" plin je zrak.

Ako se električni potencijal na G.M. brojaču postepeno podiže, dobit ćemo postepen prijelaz rada od područja u kojemu se samo sabiru ioni i elektroni, preko područja proporcionalne sekundarne ionizacije, do napona kod kojeg je stupanj sekundarne ionizacije u brojaču neovisan o broju primarnih iona. Ovo posljednje je područje rada G.M. brojača. Sl.1. ilustrira ovu ovisnost za dvije različite početne ionizacije, npr., od jedne α i jedne β čestice. Kod sasvim niskih napona, zbog rekombinacije, imamo samo djelomično sakupljanje naboja. Povećanjem napona rekombinacija postaje zanemariva i u nekom području napona dobiva se jednak ukupno sakupljen naboj

uz jednaku početnu ionizaciju. To je područje rada ionizacijske komore. Daljnje povećanje napona dovodi do sekundarne ionizacije. Između dva sudara u plinu, elektroni se u području snažnog polja oko anode ubrzaju dovoljno da mogu proizvesti sekundarnu ionizaciju. To je područje rada proporcionalnog brojača. Daljnje povećanje napona dovodi do širenja sekundarne ionizacije duž cijele anode, pa, iako amplituda električnog impulsa s naponom još uvijek raste, na stalnom naponu dobiva se ipak jednaka amplituda bez obzira da li je primarno proizveden jedan ili velik broj parova ion-elektron.

Gotovo svi G.M. brojači imaju dodatak para organskih spojeva ili para halogenih elemenata. Takvi brojači nazivaju se "samo-gašeći" (engl. self-quenching). Kad u takav brojač u radnim uvjetima ude brza nabijena čestica, ona gubi energiju i proizvodi niz parove elektron-ion. Pod djelovanjem električnog polja elektroni se brzo gibaju prema anodi. Snažno električno polje u blizini anode ubrzava elektrone toliko, da između sudara s molekulama plina dosegnu energiju koja je dovoljna da izvrše sekundarnu ionizaciju. Primarni i sekundarni elektroni nastavljaju ovim procesom, te se dobiva "lavina" elektrona, koje sakuplja anoda. Neki atomi budu samo uzbuđeni i deeksitiraju se emisijom fotona. Ultravioletni fotoni snažno se apsorbiraju u višeatomskom plinu već nakon oko jednog milimetra. Na taj način proizvede se ionizacija u okolnom plinu, gdje se pojavljuje nova "lavina". Ova ionizacija širi se duž anode brzinom od oko $10 \text{ cm}/\mu\text{s}$. Ioni se pritom malo kreću zbog svoje relativno male brzine, pa se na kraju postigne stanje, u kojem je duž cijele anode, u njenoj neposrednoj blizini, oblak pozitivnih iona. Treba istaći da, iako su u taj čas elektroni sabrani, pad električnog potencijala na brojaču još gotovo nije započeo. Razlog je što su elektroni prošli relativno malu promjenu potencijala.

Električno polje, zbog ionskog omotača, nije više tako koncentrirano oko anode, jer pozitivni ioni uzrokuju postepeniju promjenu potencijala. Zbog ovog efekta u brojaču kroz jedno vrijeme neće biti moguća nova sekundarna ionizacija jednakog obima. Kroz to tzv. "mrtvo vrijeme" brojač neće registrirati prolaz nove čestice, jer se dobivaju impulsi manje amplitude koja nije dovoljna da premaši prag diskriminatora. Prag diskriminatora podešen je tako, da sama primarna ionizacija i manji impulsi ne proizvode dovoljno snažan električki impuls za brojanje, a uvodi se zbog izbjegavanja smetnji (impulsi u mreži i sl.).

Dok se lavine sekundarnih ionizacija šire aksijalno duž anode brojača, počinje relativno sporo radijalno širenje ionskog sloja prema katodi.

Vrijeme sakupljanja pozitivnih iona relativno je dugo, u području 200-400 μ s. Oni, međutim, u prvoj fazi gibanja imaju najveće brzine zbog snažnog polja, a ujedno prelaze najveće promjene potencijala. Zbog toga je glavni dio pada električnog potencijala (impuls) uzrokovan ovom fazom procesa u brojaču.

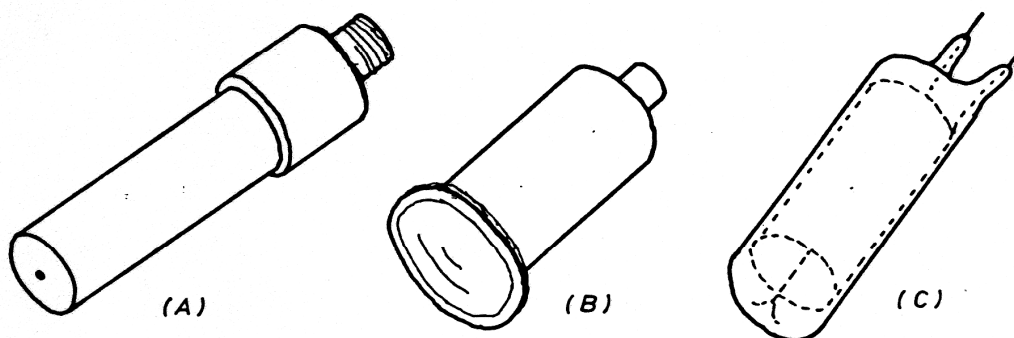
Uloga dodatnih organskih ili halogenih para je dvostruka. Zbog snažne apsorpcije ultravioletnog zračenja, u njima se sekundarna ionizacija širi duž anode brojača. Međutim, još veća je važnost tih molekula u tome što sprječavaju, gase, nastavak ionizacije. Kada bi ion argona, sa svojim prvim ionizacionim potencijalom od 15,7 eV, došao do katode, dva bi procesa mogla uzrokovati oslobađanje novog elektrona. Jedan proces je emisija ultraljubičastog fotona energije 15,7 eV manje energija vezanja vodljivih elektrona u metalu. Ultraljubičasti fotoni, kao što je spomenuto, snažno se apsorbiraju u plinu fotoelektričnim efektom. Moguće je, također, da pozitivni ion naprosto izvuče elektron nadoknativši energiju vezanja kinetičkom energijom (proces emisije polja). Dovoljan je samo jedan slobodan elektron da se u ovom, oko 200 μ s kasnijem, trenutku, kada je brojač već postao osjetljiv, izazove nov izboj. Proces bi se očito bez prekida nastavljao. Gašenje se postiže tako da ioni argona u sudarima s organskim molekulama ili molekulama halogenog elementa prenose ionizaciju na molekule. Da bi se taj prijenos postigao, uzimaju se molekule koje imaju niži prvi ionizacioni potencijal. Zbog relativno dugog vremena gibanja do katode, ionizacija se u potpunosti prenese na molekule. Elektron iz metala nema mogućnosti da se oslobodi procesom emisije polja, pa neutralizira molekulu. Pri tom se ne emitira ultraljubičasti foton, jer se višak energije troši na disocijaciju molekule. Na taj način sprječava se novi izboj u brojaču. Zbog toga ih nazivamo "samo-gašeći" G.M. brojači.

U standardnom brojaču nalazi se oko 10^{20} molekula organskih ili halogenih para. Prilikom svakog impulsa disociira se oko 10^{10} molekula. Pare organskog spoja, obično alkohola, na taj se način troše i nakon oko 10^9 impulsa brojač ne radi dobro. Molekule halogenih elemenata, obično broma, se rekombiniraju. Trajanje "halogenih" brojača u principu je bez ograničenja. Ipak, i oni se pokvare, obično zbog postepenog onečišćenja brojačkog plina (stijenke brojača postepeno propuštaju zrak u brojač).

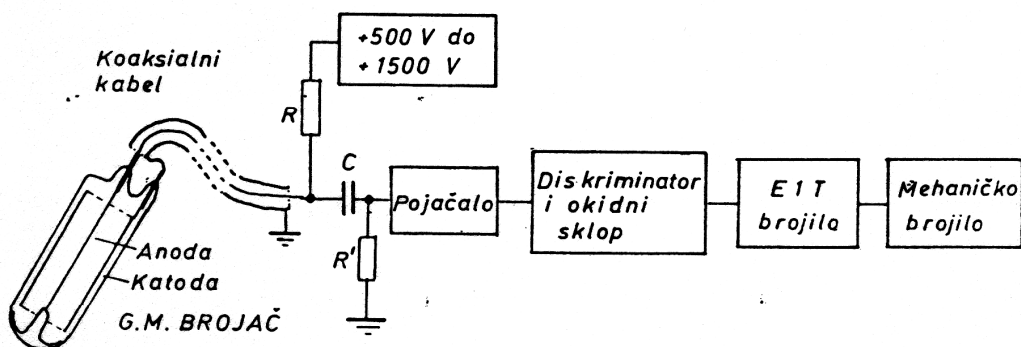
Geiger i Müller, u originalnom radu iz 1928., primijenili su drugi način prekidanja izboja. Oni su upotrebljavali anode prekrivene tankim, slabo vodećim slojem. Nakon pojedinog otkucaja elektroni su došli na vanjsku

plohu sloja i električki "zasjenili" anodu. Vrijeme odvođenja elektrona kroz sloj oko anode bilo je dovoljno dugo da se saberu ioni i spriječe svi izboji od različitih procesa zakašnjele ionizacije. Anodu su pripravljali jednostavnom oksidacijom željezne žice ili su upotrebljavali lakiranu žicu.

Ima mnogo vrsta G.M. brojača koje su podešene različitim primjenama. Neke od njih prikazuje Sl.2.



Sl.2. G.M. brojači: (A) beta brojač s aluminijskom katodom, (B) zvonasti beta brojač s tinjčevim prozorom, (C) stakleni brojač



Sl.3. Shematski prikaz uređaja za brojanje s G.M. brojačem

ELEKTRONSKI UREDAJ ZA G.M. BROJAČ

Za rad G.M. brojača potreban je izvor visokog napona i prikladno je imati na raspolaganju brzo elektronsko brojilo. Katoda se obično uzemljuje, a anoda napaja visokim naponom preko visokoomskog otpora. Električni impulsi amplitude od par volta prenose se veznim kapacitorom koji odvaja visok napon od niskonaponskog ulaza u pojačalo. Električni impulsi vode se u pojačalo, diskriminator s okidnim sklopom i u brojilo. Neki uređaji imaju

ugraden mjerač brzine brojenja, na kojem se može očitavati trenutni broj otkucaja u jedinici vremena.

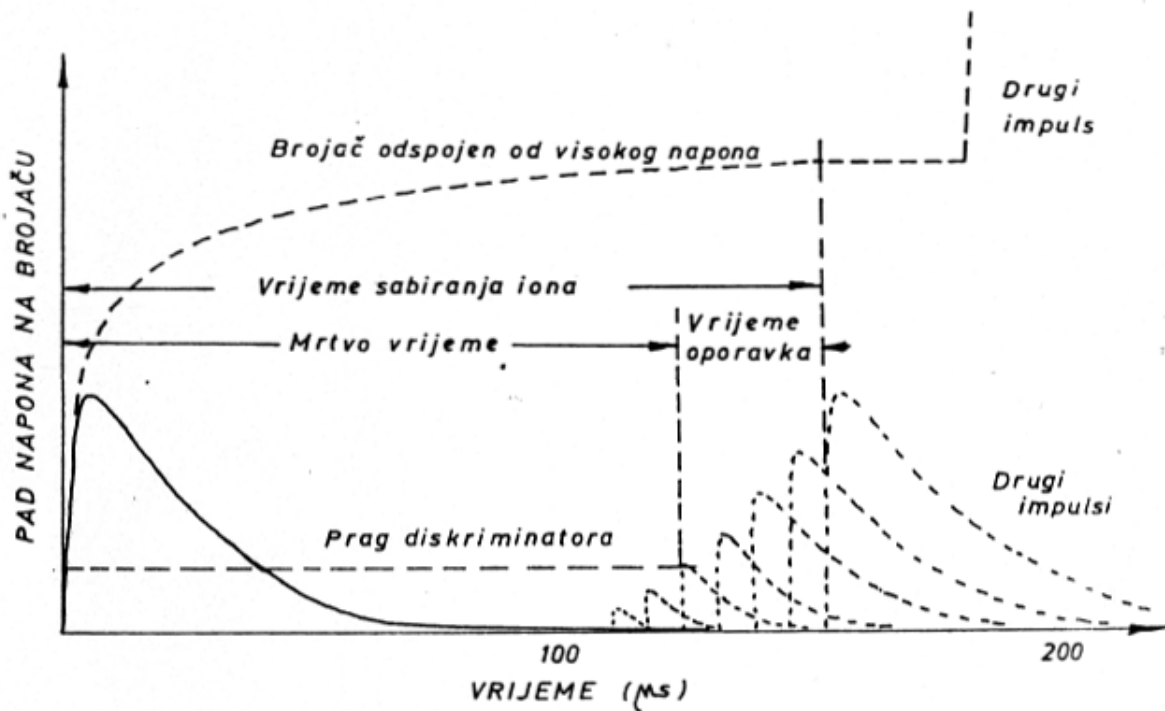
NAPONSKA KARAKTERISTIKA BROJAČA

Važno svojstvo G.M. brojača je vrlo mala ovisnost broja otkucaja o naponu napajanja. Broj otkucaja u danim uvjetima mijenja se svega par postotaka kada se napon na brojaču mijenja unutar radnog područja. Taj interval napona zovemo radno područje ili plato, a širina mu je 100 do 300 volta. Radno područje određuje se tako da se s izvorom srednje jačine mjeri broj otkucaja brojača u ovisnosti o naponu. Za niske napone brojilo ne broji zbog toga što sekundarna ionizacija nije dosegla stupanj koji bi dao dovoljno visoke impulse da premaše prag diskriminatora. Kad se dosegne napon praga, impulsi su još ovisni o početnoj ionizaciji, pa tek neke od upadnih čestica proizvedu dovoljnu početnu ionizaciju za brojenje. Kad se dosegne najniži radni napon, izboj u brojaču prestaje biti ovisan o početnoj ionizaciji. Povećanjem napona amplitude impulsa rastu, ali njihov broj povećava se tek neznatno - zbog povećanja osjetljivog volumena na krajevima brojača. Za više napone ionizacije se toliko poveća da gašenje nije više stopostotno. Povremeno se dešavaju dvostruki impulsi, pa njihov broj postepeno, pa sve brže, raste s naponom. Daljnje povećanje napona uzrokuje neprekidan izboj. Treba izbjegavati ovaj uvjet rada zbog brzog trošenja brojača.

ELEKTRIČNI IMPULS IZ G.M. BROJAČA

Kad bi se prekinuo spoj s visokim naponom, nakon što je brojač bio doveden na radni napon, napon na brojaču bi se smanjio prilikom svakog otkucaja. Naime, naboj na kapacitetu C koji čine brojač i spojni kabel i ulaz upojačalo bio bi smanjen za ukupno sakupljen naboj od impulsa. Takva vremenska ovisnost napona prikazana je crtkano na Sl.4. U normalnim uvjetima rada kroz otpor R dovodi se napon natrag na punu vrijednost, s konstantom RC . Zbog toga se dobivaju "derivirani" impulsi prikazani punom linijom. Ako se uz brojač stavi jači izvor, gustoća impulsa se poveća i na osciloskopu mogu se povremeno vidjeti, nakon pojedinog ("prvog") impulsa, vremenski bliski ("drugi") impulsi. Amplituda "drugih" impulsa varira u ovisnosti o zakašnjenju, kako prikazuju točkaste linije. Mrtvo vrijeme brojača je vrijeme od početka "prvog" do početka "drugog" impulsa koji ima dovoljno veliku amplitudu da aktivira diskriminator brojila. Mrtvo vrijeme smanjuje

se s povećanjem napona jer a) amplitude rastu i b) brzine iona se povećavaju. Vrijeme oporavka brojača traje sve dok se ne saberu svi ioni, a tada amplituda "drugog" impulsa dosegne punu vrijednost.

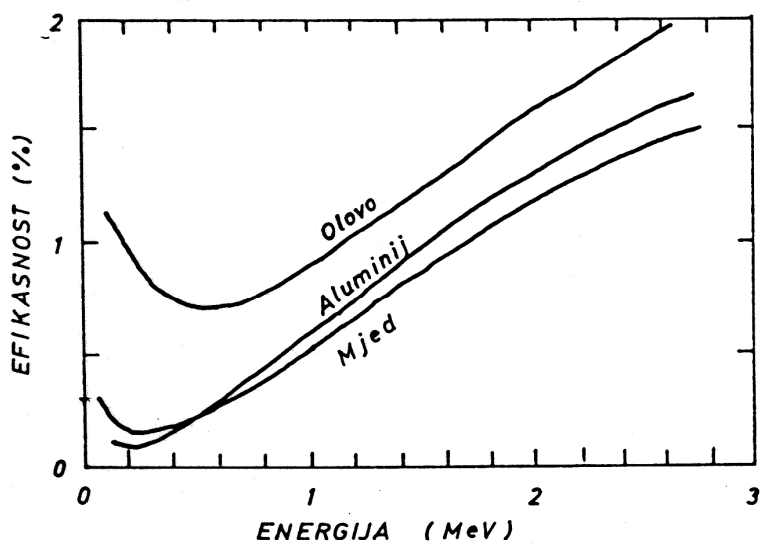


Sl.4. Pad napona na G.M. brojaču u ovisnosti o vremenu. Svaki impuls izblja električni naboj na brojaču. Kad ne bi stalno bio spojen na izvor visokog napona preko "radnog otpornika", napon bi mu se smanjivao (gornja crtkana linija). U normalnim uvjetima rada napon se vraća na punu vrijednost i dobivaju se "derivirani" impulsi, (puna linija). Za vrijeme sabiranja iona polje u brojaču je oslabljeno, pa se dobivaju manji "drugi" impulsi.

Pomocu osciloskopa mogu se proucavati svojstva elektricnih impulsa iz G.M. brojača u ovisnosti o naponu brojača. To su oblik impulsa, ovisnost amplitude o naponu, mrtvo vrijeme i vrijeme oporavka.

DJELOTVORNOST G.M. BROJAČA

Kod mjerenja aktivnosti pomoću G.M. brojača često je potrebno odrediti apsolutan broj čestica koje emitira preparat. U tu svrhu potrebno je poznavati odnos između broja čestica koje dolaze na površinu brojača, i broja impulsa, koji one uzrokuju. Apsorpcija u stijenkama brojača može imati velik utjecaj. Npr. alfa čestice često ne mogu prodrijeti u brojač zbog relativno malog dosega. Često se djelotvornost G.M. brojača definira kao omjer broja otkućaja (uzevši u obzir mrtvo vrijeme) i broja brzih električki



Sl.5. Efikasnost G.M. brojača s katodama od mjedi, aluminija i olova za detekciju gama zračenja u ovisnosti o energiji.

nabijenih čestica, koje prođu kroz osjetljiv volumen. Ta je osjetljivost vrlo visoka. Dovoljan je jedan elektron-ion par da se izazove izboj u brojaču. Ako, npr., čestica s jednim elementarnim nabojem na minimumu ionizacije prođe kroz 2 cm plina u brojaču, recimo kod tlaka od oko 10 kPa smjese argona sa 10% alkohola, u prosjeku će biti proizvedeno 8 parova elektron-ion. Prema Poissonovoj raspodjeli, vjerojatnost, da u tom slučaju čestica neće proizvesti niti jedan par, jednaka je tada e^{-8} . Vjerojatnost da će biti proizveden jedan ili više parova ion-elektron jednaka je dakle $(1 - e^{-8}) \approx 1$. Očito je da je ova "unutarnja" osjetljivost za nabijene čestice vrlo visoka. Djelotvornost za gama zračenje ovisi o vjerojatnosti da foton nekim procesom izbaci elektron u osjetljiv volumen brojača. Doprinos brojačkog plina vrlo je malen zbog male mase plina. Bitan doprinos dolazi od interakcije fotona sa stijenkom brojača, dakle s katodom. Zato G.M. brojači za gama zračenje trebaju imati stijenke odnosno dodatni oklop, čija je debljina otprilike jednaka dosegju elektrona koje izbacuju fotoni. U području energija oko 1 MeV najveći doprinos je od Comptonovog efekta koji gotovo ne ovisi o protonskom broju Z . Na niskim energijama zbog fotoelektričnog efekta i na visokim, zbog tvorbe parova, materijali s visokim Z daju veće djelotvornosti. Za ilustraciju na Sl. 5. je prikazana djelotvornost G.M. brojača s katodom od mjedi, aluminija i olova za fotone energije do 3 MeV.