

UNIVERZITET U NOVOM SADU  
PRIRODNO - MATEMATIČKI FAKULTET  
INSTITUT ZA FIZIKU

LEA NIDERLENDER

ISPITIVANJE NISKOŠUMNE ZAŠTITE ZA GAMA-SPEKTROMETAR

DIPLOMSKI RAD

NOVI SAD, FEBRUAR 1985.

*Ovaj diplomski rad je radjen u Laboratoriji za nuklearnu fiziku, Instituta za fiziku PMF-a u Novom Sadu.*

*Zahvaljujem se Dr Lazaru Marinkov, na savetima u izboru teme. Takodje, zahvaljujem se dr Ištvánu Bikit na korisnim sugestijama pri izradi ovog rada. Posebnu zahvalnost dugujem asistentu Miroslavu Vesković na svesrednoj pomoći u toku izrade eksperimentalnog dela ovog rada.*

## S A D R Ž A J

	strana
U V O D .....	1
1. PRIMENE NISKOŠUMNE MERNE TEHNIKE .....	3
1.1. RADIOAKTIVNO ZRAČENJE U PRIRODI .....	3
1.2. AKTIVACIONA ANALIZA .....	7
2. NAČINI NISKOŠUMNE ZAŠTITE .....	10
2.1. LOKACIJA .....	10
2.2. PASIVNA ZAŠTITA .....	11
2.3. AKTIVNA ZAŠTITA .....	13
3. OPIS SPEKTROMETARSKOG SISTEMA I GVOZDENE ZAŠTITE .....	15
3.1. OSNOVNE KARAKTERISTIKE Ge/Li/ SPEKTROMETRA .....	15
3.2. OPIS NISKOŠUMNE ZAŠTITE ZA Ge/Li/ SPEKTROMETAR....	18
4. ISTRAŽIVANJE STRUKTURE FONA .....	23
4.1. REZULTATI MERENJA SA KOMENTARIMA .....	23
4.2. ODREDJIVANJE MINIMALNE AKTIVNOSTI .....	30
4.3. ISPITIVANJE VARIJACIJE FONA .....	35
5. Z A K L J U Č A K .....	37
6. R E F E R E N C E .....	38
7. P R I L O Z I .....	39

## U V O D

Niskošumna merenja (low-level counting) predstavljaju merenja niskih aktivnosti (kakvi postoje u prirodnim uzorcima). Pri merenjima ovako niskih aktivnosti jasno je da se mora obezbediti merni instrument visoke osetljivosti kao i zaštita od pozadinskog zračenja.

Pod pozadinskim zračenjem podrazumeva se svako zračenje koje dopire do efikasne zapremine detektora a ne potiče od uzorka koji se ispituje. Izvori pozadinskog zračenja mogu se grupisati u pet kategorija:

- prirodna radioaktivnost materijala samog detektora,
- prirodna radioaktivnost materijala zaštite i pomoćne opreme,
- radioaktivnost okoline,
- primarna i sekundarna komponenta kosmičkog zračenja,
- atmosferska radioaktivnost.

Prirodna radioaktivnost materijala koji okružuju detektor potiče od članova radioaktivnog niza urana - torijuma, te izotop  $^{40}\text{K}$  i dugoživeći fisioni produkti (koji su rasprostranjeni po celoj zemljinoj površini a posledica su nuklearnih eksplozija). Elementi koji dominiraju u pozadinskom zračenju a predstavljaju članove radioaktivnog niza urana i torijuma su:  $^{228}\text{Ac}$ ,  $^{224}\text{Ra}$ ,  $^{212}\text{Bi}$ ,  $^{211}\text{Pb}$  i  $^{208}\text{Tl}$  (u torijumovom nizu)  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{214}\text{Pb}$  i  $^{214}\text{Bi}$  (u uranijumovom nizu). O dugoživećih fisionih produkata u pozadinskom zračenju dominira  $^{137}\text{Cs}$ . Neki materijali kao što je, na primer, Pirex staklo sadrže torijum i kalijum kao normalne konstituente i kao takvi daju veliki doprinos zračenju pozadine. Većina drugih materijala sadrži ove elemente kao nečistoće a njihov doprinos zračenju pozadine može se smanjiti izborom visoko prečišćenih uzoraka.

## 2.

Izvor pozadinskog zračenja takođe predstavlja i radioaktivnost samog ambijenta u kome se nalazi detektor (konstrukcioni materijal laboratorije, vazdušni ambijent). Radon i toron su kratkoživeći radioaktivni gasovi koji potiču iz niza urana i torijuma a prisutni su u konstrukcionom materijalu laboratorije (zidovi, podovi).

Značajnu komponentu pozadinskog zračenja predstavljaju sekundarne radijacije koje nastaju interakcijom kosmičkih zraka i zemljinom atmosferom. Visoki energetski kosmički zraci u zemljinoj atmosferi indukuju kaskadno-lančane procese pri kojima nastaju  $\mu$ -mezoni, elektroni, neutroni i gama-zraci.

Pored zračenja pozadine na odbroj detektora mogu uticati i parazitni električni impulsi nastali u lancu elektronskih uređaja.

Pošto veličina pozadinskog zračenja određuje granicu detekcije odnosno minimalni nivo zračenja koji se može detektovati, ona je od posebnog značaja u svim merenjima niskih nivoa radioaktivnosti. Nime, radi se o tome da se granica detekcije može znatno smanjiti samo obezbeđenjem niskošumne zaštite od pozadinskog zračenja, kako je naglašeno u samom početku.

## 1. PRIMENE NISKOŠUMNE MERNE TEHNIKE

### 1.1. RADIOAKTIVNO ZRAČENJE U PRIRODI

Tehnika niskošumnih merenja je, može se slobodno reći, svoju najveću primenu našla na polju prirodne radioaktivnosti.

Radioaktivni elementi kao ionizujuća zračenja su prisutni svuda na našoj planeti i u svemiru. Zemljinu površinu kontinualno bombarduju čestice visokih energija kao i elektromagnetna zračenja različitih energija koja dolazi iz dubine kosmosa - kosmička zračenja. Do površine zemlje dospeva i radioaktivno zračenje radionuklida koji su dispergovani u zemljinoj kori. Ovi radioaktivni elementi migracijama dospevaju u vode i atmosferu a kroz njih i u živi svet na našoj planeti.

Kosmičko zračenje predstavlja fluks čestica izvanredno višoke energije koje dospevaju u zemljinu atmosferu iz kosmičkog prostranstva i koje izazivaju mnogobrojne nuklearne transmutacije. Po svojoj prodornosti razlikuju se dve komponente kosmičkog zračenja manje prodorna (meko) i višeprodorno (tvrd). Meka komponenta kosmičkog zračenja sadrži nanelektrisane čestice mase elektrona i energije reda veličine  $10-10^{11}$  eV, pa i više. Te čestice se proizvode u lavinama i pljuskovima koji su izazvani primarnim zračenjem u atmosferi zemlje. Pokazalo se da je proces stvaranja pljuskova proporcionalan sa  $Z^2$  materijala u kome se on dešava. Zavisnost od  $Z^2$  kod proizvodnje pljuskova je ukazivala na procese proizvodnje parova i elektromagnetnih procesa zakočnog zračenja. Utvrđeno je da su čestice u pljusku meke komponente uglavnom elektroni izazvani visokoenergetskim fotonima koji nastaju raspadom  $\pi^0$  - mezona u atmosferi. Primarne čestice su

## 4.

uglavnom protoni i  $\alpha$ -čestice veoma visokih energija. Tvrda komponenta kosmičkog zračenja se sastoji od čestica koje imaju srednju masu (izmedju mase protona i elektrona). Te čestice su nazvane mezoni. Masa mezona jednaka je približno 200-300 masa elektrona. Oni mogu biti pozitivni i negativni (naelektrisanje mezona jednako je naelektrisanju elektrona). Srednja energija mezona na nivou mora  $\sim 3 \cdot 10^9$  eV ali se sreću mezoni sa energijama od  $10^{10}$  eV pa i više. Mezoni, kao i brzi elektroni su sposobni da izazivaju pljuskove. Dalja izučavanja svojstava mezona su pokazala da su oni nepostojani i da se raspadaju. Njihov kratak period života pokazuje da oni ne mogu biti primarne čestice, oni se radaju u atmosferi pod uticajem nekih drugih čestica.

Od prirodnih radioaktivnih izotopa većina pripada jednoj od radioaktivnih familija koje postoje na zemlji: uranijumova, aktinijumova i torijumova familija. Uz te, docnije je veštački formirana neptunijumova familija. U svakoj familiji  $\alpha$  i  $\beta$  emisija su glavni procesi raspada, tako formirani nizovi elemenata i izotopa su uglavnom slični kod familija, ali se javljaju odgovarajuće razlike. Pošto se mase menjaju samo usled  $\alpha$  emisije članovi svakog niza imaju mase koje se razlikuju za umnožak od četiri jedinice. Nizovi koji se javljaju u prirodi nastaju od jezgara čiji je život dug u poređenju sa starošću zemlje. Svaki niz se završava kada proces raspada dovede do formiranja stabilnog izotopa (krajnji član). Polazni i krajnji članovi su dati u tabeli 1.

TABELA 1. - Polazni i krajnji članovi radioaktivnih nizova

Ime niza	Maseni broj	Polazno jezgo	Poluživot (god.)	Krajnji član
Torijumov niz	$4n$	$^{232}\text{Th}$	$1,4 \cdot 10^{10}$	$^{208}\text{Pb}$
Neptunski niz	$4n+1$	$^{237}\text{Np}$	$2,2 \cdot 10^6$	$^{209}\text{Bi}$
Uranijumov niz	$4n+2$	$^{238}\text{U}$	$4,5 \cdot 10^9$	$^{206}\text{Pb}$
Aktinijumov niz	$4n+3$	$^{235}\text{U}$	$7,2 \cdot 10^8$	$^{207}\text{Pb}$

Iz tabele 1 vidi se da se prirodni radioaktivni nizovi završavaju s izotopima olova i to objašnjava prisustvo olova u radioaktivnim rudama, kao i razlike u izotopskom sastavu tog "radiogenog" olova i običnog olova.

Od posebnog su interesa izotopi uranijuma i torijuma koji omogućavaju određivanje absolutne starosti minerala, stenja i kosmičkih objekata. U tabeli 1.1. je data lista aktivnih elemenata koji nisu povezani sa glavnim familijama a koji su takođe od interesa za geološka merenja. To su sve niskoenergetski  $\beta$  emiteri ili jezgra koja podležu elektionskog zahvatu (osim samarijuma i neodijuma).

TABELA 1.1. - Prirodna radioaktivnost izotopa koji nisu povezani sa glavnom familijom.

Radioaktivni izotop	Poluživot (god.)	Vrsta zračenja	Izmerena en.zračenja (MeV)
$^{40}\text{K}$	$1,3 \cdot 10^9$	$\beta^-$	1,46
$^{50}\text{V}$	$5 \cdot 10^{15}$	$\beta^-$	1,19
$^{87}\text{Rb}$	$5 \cdot 10^{10}$	$\beta^-$	0,273
$^{115}\text{In}$	$6 \cdot 10^{14}$	$\beta^-$	0,600
$^{138}\text{La}$	$1 \cdot 10^{11}$	$\beta^-$	0,21
$^{144}\text{Nd}$	$3 \cdot 10^{15}$	$\alpha$	1,8
$^{147}\text{Sm}$	$1,3 \cdot 10^{11}$	$\alpha$	2,2
$^{176}\text{Lu}$	$4,5 \cdot 10^{10}$	$\beta^-$	0,43
$^{187}\text{Re}$	$4 \cdot 10^{12}$	$\beta^-$	0,043

Ako imamo niz radioaktivnih izotopa ( $N_1, N_2, N_3$ ) koji se raspadaju jedan u drugi konstantama radioaktivnog raspada ( $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ), radioaktivni proces se može opisati sa tri diferencijalne jednačine u sledećem obliku:

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 \quad \frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad \frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2 \quad /1/$$

6.

Uzmimo samo slučaj kad aktivno jezgro  $N_2$  nastaje raspadom jezgra  $N_1$ . Ovaj proces je opisan prvim dvema jednačinama sistema /1/.

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 \quad \frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$$

U većini slučajeva potrebno je naći aktivnost raspada i za te veličine dobijamo:

$$\text{Aktivnost od } N_1 = \lambda_1 N_1 = \lambda_1 N_1(0) e^{-\lambda_1 t}$$

$$\text{Aktivnost od } N_2 = \lambda_2 N_2 = \lambda_2 N_2(0) e^{-\lambda_2 t} + \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1(0) (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

$N_1(0)$  i  $N_2(0)$  su količine atoma u trenutku  $t=0$ .

Ako u početku vremena nije bilo atoma  $N_2$ ,  $N_2(0) = 0$ , te u bilo kom vremenu:

$$\frac{\text{Aktivnost od } N_2}{\text{Aktivnost od } N_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (1 - e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)t}), \quad /2/$$

Javlja se 2 slučaja:

a)  $\lambda_2 > \lambda_1$  (period poluraspada pretka veći od perioda poluraspada potomka)

Odnos aktivnosti /2/ teži ka konstantnoj vrednosti  $\lambda_2/\lambda_2 - \lambda_1$ , na kraju obe aktivnosti opadaju sa poluživotom polaznog jezgra. Kada je odnos  $\lambda_2/\lambda_2 - \lambda_1$  postignut javlja se stanje prelazne ravnoteže.

b)  $\lambda_2 \gg \lambda_1$

Odnos aktivnosti /2/ teži ka jedinici, te se javlja vekovna ravnoteža (sekularna). U slučaju dugoživećeg polaznog jezgra aktivnosti sukcesivno

proizvedenih članova su dati u jednačinama:

$$\lambda_1 N_1(0) = \lambda_2 N_2 = \lambda_3 N_3 = \dots = \text{konstanta}$$

Sve aktivnosti su konstantne i relativne količine raznih proizvoda raspada su obrnuto proporcionalne njihovim konstantama raspada.

Aktivnost potomka je data sa:

$$A_2 = \lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_1(0) (1 - e^{-\lambda_2 t})$$

Vidi se da aktivnost potomka raste sa vremenom i posle nekoliko perioda poluraspada potomka njegova aktivnost će se izjednačiti sa aktivnošću pretka.

Prirodna radioaktivna rasplodila je naročito poremećena posle nuklearnih eksplozija kada je oslobođena velika količina radio izotopa. Neki od tih izotopa su fisioni proizvodi ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{144}\text{Ce}$ ,  $^{95}\text{Zr}$ ,  $^{95}\text{Nb}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{106}\text{Ru}$  ...), dok drugi potiču od interakcije neutrona sa elementima zemljine kore i atmosfere. Radioizotopi koji nastaju kao rezultat čovekovih aktivnosti (procesi fisije, ozračivanje stabilnih izotopa u nuklearnim reaktorima) danas predstavljaju nabrojnije izvore zračenja.

U poslednje vreme sve je veća upotreba radioizotopa u medicini, industriji i sve je brži razvoj nuklearnih elektrana. Samim tim zaštita čovekove sredine od radioaktivnog zračenja postaje sve aktuelnija. U tu svrhu potrebno je pratiti i registrovati i najmanje promene aktivnosti radioizotopa u prirodi, s obzirom da donji prag štetnog dejstva ionizujućeg zračenja na žive organizme ne postoji.

## 1.2. AKTIVACIONA ANALIZA

Jedna od najčešće korišćenih analitičkih metoda u nuklearnoj fizici je metoda aktivacione analize.

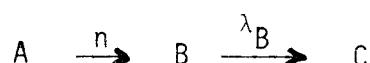
Aktivaciona analiza se bazira na merenju aktivnosti uzorka koja je indukovana neutronima, fotonima i nanelektrisanim česticama. Najpogodnija je neutronska aktivacija termalnim i brzim neutronima (neutroni či-

8.

ja se energija kreće u intervalu  $0,05 \text{ eV} < E_n < 0,4 \text{ eV}$ ). Značajni izvori termalnih neutrona su nuklearni reaktori. Oni daju fluks neutrona  $\sim 10^{11} \text{n/S} \cdot \text{cm}^2$ .

Svako radioaktivno jezgro emituje nuklearno zračenje određene energije i odredjene konstante raspada. Kada jezgro zahvati neutron ono biva pobudjeno za iznos energije veze uhvaćenog neutrona. Prelaskom u osnovno stanje vrši se emisija gama-kvanata. Efikasni presek za radijativni zahvat termalnih neutrona ( $\sigma \sim 10^{-3} - 10^5 \text{ b}$ ) ponaša se kao  $1/v$ , tako da je osnovni tip reakcije  $(n, \gamma)$ .

Neka jezgra proizvoljnog izotopa A zahvatom neutrona prelaze u jezgro B. Jezgro B se dalje raspada sa karakterističnom konstantom  $\lambda_B$  u jezgro C (jezgro novog izotopa).



$$\frac{dN_B}{dt} = \sigma_A \phi N_A - \lambda_B N_B$$

Integracijom ove jednačine dobijemo broj radioaktivnih jezgara izotopa B posle ozračivanja u vremenu t.

$$N_B^0 = \frac{\sigma_A \phi N_A}{\lambda_B} (1 - e^{-\lambda_B t})$$

Aktivnost posle ozračivanja je:

$$A_B^0 = \lambda_B N_B^0 = \sigma_A \phi N_A (1 - e^{-\lambda_B t})$$

Aktivnost posle vremena  $t'$  od ozračivanja:

$$A_B = \sigma_A \phi N_A e^{-\lambda_B t'} (1 - e^{-\lambda_B t})$$

Na kraju merenja aktivnost je data sa:

$$A_B' = \sigma_A \phi N_A e^{-\lambda_B t'} (1 - e^{-\lambda_B t}) e^{-\lambda_B t''}$$

$t''$  - vreme merenja.

Detektovana aktivnost, broj raspada po sekundi:

$$A_B - A'_B = \sigma_A \Phi N_A (1 - e^{-\lambda_B t}) e^{-\lambda_B t'} (1 - e^{-\lambda_B t''})$$

$$N_A = \frac{1}{M_A} n_A m_A \Theta_A \quad m_A = M_A N_A / \Theta_A n_A$$

$n_A$  - Avogadrov broj

$\Theta_A$  - izotopski sastav

$M_A$  - atomska masa

$m_A$  - masa izotopa koji se aktivira u uzorku.

$$A_B - A'_B = \frac{\sigma_A \Phi_A m_A n_A \Theta_A}{M_A e^{\lambda_B t}} (1 - e^{-\lambda_B t})(1 - e^{-\lambda_B t''}) \quad /3/$$

Na osnovu formule /3/, merenjem aktivnosti ( $A_B - A'_B$ ) mogu se odrediti nepoznate veličine na desnoj strani jednačine ( $m_A$ ,  $\sigma_A$ ,  $\Phi$ ).

Ukoliko je neka od ovih veličina male vrednosti, tada je i ukupna aktivnost mala veličina i linija u spektru će biti slaba, te je za njeno određivanje potrebno da "fon" bude što niži (npr., merenje malih preseka ili merenje malih koncentracija pojedinih izotopa) što se može postići merenjem aktivnosti uzorka u niskošumnoj zaštiti.

Osjetljivost ove metode, u opštem slučaju zavisi od: broja radioaktivnih jezgara nastalih ozračivanjem u reaktoru, vremena merenja aktivnosti i trajanja ozračivanja, efikasnog preseka za aktivaciju, efikasnosti mernog instrumenta za detekciju zračenja, itd. Preciznost i tačnost metode zavise od homogenosti i priprema uzorka, uslova zračenja, nuklearne konstante, i metoda merenja aktivnosti (odnosno od odnosa  $I_{vrh}/I_{fon}$ , tj. površine vrha prema površini fona za dati vrh, koji se može povećati merenjem aktivnosti u niskošumnoj zaštiti).

## 2. NAČINI NISKOŠUMNE ZAŠTITE

Poseban problem u merenju niskih aktivnosti predstavlja način na koji će se obezrediti zaštita spektrometarskog sistema od svih pomenutih izvora pozadinskog zračenja.

Detektor se od zračenja pozadine može zaštititi pomoću izolacionog materijala čija je radioaktivnost zanemarljivo mala. Ovaj način zaštite nazivamo pasivna zaštita. Koji će se materijal izabrati za ovu svrhu zavisi od karakteristika materijala zaštite kao što su: Zaštitna moć, čistoća i cena. Tvrdu komponentu kosmičkog zračenja ne možemo zastaviti nikakvom izolacijom, te se u cilju zaštite detektora od kosmičnog zračenja primenjuje aktivna antikoincidentna zaštita.

Pri konstrukciji zaštite od primarnog značaja su izbor lokacije i konstrukcija same laboratorije.

### 2.1. LOKACIJA

Prirodni radioaktivni izotopi su široko rasprostranjeni u zemljinoj kori. Glavni izvori ovog radioaktivnog zračenja su uranijum, torijum i produkti njihovog radioaktivnog raspada, te  $^{40}\text{K}$  kao i radioaktivni izotopi ugljenika  $^{14}\text{C}$  i vodonika  $^{3}\text{H}$  koji nastaju bombardovanjem kosmičkim zracima. Distribucija prirodnih radioaktivnih izotopa je uglavnom ravnомерна izuzev u oblastima koje su bogate granitnim ili monacitnim peskom gde je zabeležena povećana radioaktivnost od prirodnih izvora.

Poznato je da nuklearne elektrane oslobadaju znatne količine radio izotopa. Da bi se pratila njihova distribucija u prirodi potrebna je osetljiva merna tehnika.

S toga je kao prva mera koja se preduzima pri izboru lokacije zaštita od svih izvora prirodne kao i veštački stvorene radio-aktivnosti.

Veoma dobra zaštita od kosmičkog zračenja se može postići izborom podzemne lokacije laboratorije. Tako, na primer, na 5 mWe (meters of water equivalent) intenzitet mezona može biti smanjen za faktor 1,4 na 60 mWe ovaj faktor iznosi 12, dok na 5000 mWe  $10^6$ .

Posebna pažnja se mora posvetiti da konstrukcioni materijali laboratorije budu radioaktivno "čisti". Kao prva mera koja se preduzima pri izgradnji to je zaštita od prirodne radioaktivnosti sredine (zemljište, stene). Ovo se uspešno može postići oblaganjem cele konstrukcije laboratorije slojem specijalnog betona - baritni beton koji se sastoji od materijala male specifične aktivnosti. Na ovakav način gama-aktivnost se može smanjiti i 20 puta. Pod ovakvim uslovima merenja Ge(Li) detektor ( $65 \text{ cm}^3$ , bez dodatne izolacione zaštite) koji je smešten u centru same laboratorije pokazuje da je iznos gama-odbroja (100-2000 keV) reduciran za faktor 13. Signal koji potiče od  $^{40}\text{K}$  je čak 40 puta niži. Svaki materijal koji na bilo koji način dospeva u ovaku laboratoriju (dodatni merni uređaji, zaštitni izolacioni materijali) može se smatrati potencijalnim izvorom zračenja i samim tim utiče na odbroj sistema u zračenju pozadine.

## 2.2. PASIVNA ZAŠTITA

Najčešće korišćeni tip zaštite spektralnog sistema od zračenja pozadine je tzv. pasivna zaštita koja se sastoji u postavljanju nekog zaštitnog izolacionog materijala oko detektora. Pri izboru ovih materijala značajno je da oni poseduju zanemarljivo malu aktivnost, veliku gustinu, i visoki atomski broj Z (fotoelektrični proces je proporcionalan  $Z^4-Z^5$ , proces produkcije parova  $\sim Z^2$  i Comptonovog rasejanja  $\sim Z$ ).

Elementi koji zadovoljavaju većinu ovih zahteva su sledeći: olovo, gvoždje, čelik, elektrolitički bakar, živa, beton, itd.

Olovo se veoma često koristi kao zaštita detektora zbog visokog atomskog broja. Zbog svoje velike gustine dovoljna je debljina od samo nekoliko santimetara olova pa da se postigne znatna redukcija zračenja pozadine. Zaštita od olova se izradjuje u obliku višeslojnih ploča. Pre upotrebe olovo se mora prečistiti, jer ono može da sadrži značajne količine prirodne aktivnosti. Čak i prečišćeno olovo sadrži radioaktivne nečistoće kao što je olovo  $^{210}\text{Pb}$  koji je proizvod raspada  $^{226}\text{Ra}$ . Ovaj izotop ima vreme poluraspada od 20,4 godine, i s tog razloga pri izboru olova kao zaštitnog materijala potrebno je da ono bude staro i do nekoliko desetina godina.

U novije vreme (posle nuklearnih eksplozija) olovo pokazuje radioaktivnost koja je prouzrokovana radioaktivnim "padavinama" kao i nečistoćama kao što su produkti raspada torijuma. Neki primerci pokazuju aktivnost i do 1,5 Bq/g. Čisto olovo koje se koristi u zaštiti pokazuje aktivnost koja je za 2-3 reda veličine niža.

Gvoždje ili čelik su materijali koji se, takodje, često koriste u zaštiti. Od posebnog je značaja čelik koji je fabrikovan pre 1950. godine (čelik koji je korišćen u konstrukciji ratnih brodova za vreme II svetskog rata široko se koristi u niskošumnoj zaštiti), jer čelik proizveđan u novije vreme pokazuje prisustvo radioaktivnih primesa kao što su:  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ , Th.

Vrlo efektan zaštitni materijal je i živa. Ona može biti prečišćena do visokog stepena putem destilacije tako da pokazuje veoma nisku aktivnost. Kao zaštitni materijal živa se koristi kao unutrašnja komponenta masivnih zaštita od gama-zračenja. Na sobnim temperaturama živa se nalazi u tečnom stanju, tako da se smešta u odgovarajuće kontejnere. Ovi kontejneri su izradjeni od lucitnog stakla, materijala koji ima nisku aktivnost. Zbog svoje gustine koja je veća od gustine olova (isto važi i za atomski broj Z) dovoljna je debljina od nekoliko santimetara žive pa da se postigne efikasna zaštita od gama-zračenja.

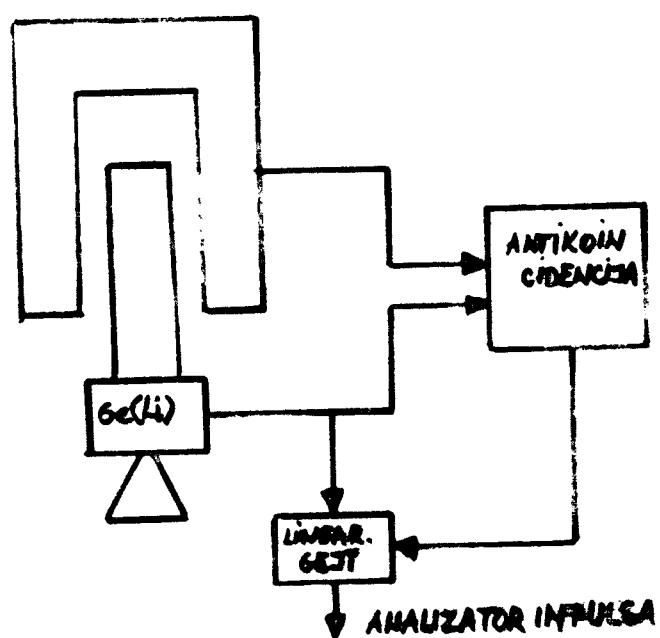
Beton se često koristi u konstrukciji masivne zaštite i to kao njena spoljašnja komponenta. Njegova aktivnost može biti relativno visoka usled prisustva radioaktivnih nečistoća kao što su  $^{40}\text{K}$ , U i radioaktivne "padavine". Zbog toga je pri korišćenju ovog materijala, kao zaštita

uobičajeno da se njegova unutrašnja površina obloži slojem čelika, olova, žive ili nekim drugim materijalom niske aktivnosti. Vrlo efikasna zaštita se može postići korišćenjem tzv. "baritnog betona". Ova "površinska aktivnost" kod drugih materijala, npr. gvožđa, može se smanjiti peskarenjem kao i bojenjem.

Zaštita od radioaktivnosti samog ambijenta u kome se nalazi detektor, a koja je prouzrokovana prisustvom radioaktivne prašine, radioaktivnih gasova (radon, toron) može se postići obezbeđenjem ventilacije i filtracije vazduha.

### 2.3. AKTIVNA ZAŠTITA

Značajna redukcija pozadinskog zračenja može se postići putem aktivne antikoincidentne zaštite, koja se sastoji u postavljanju zaštitnih (guard) detektora oko glavnog detektora, a koji rade u antikoincidenciji sa glavnim (primarnim) detektorom. Opšta postavka antikoincidentne zaštite data je na slici 1.



slika 1.

#### 14.

Primarni (Ge/Li/) detektor je okružen sekundarnim (guard) detektorom, a izlazni impuls primarnog detektora antikoincidentna kola prihvata samo ukoliko nije praćen koindicentnim impulsom spoljašnjeg detektora.

Na ovakav način antikoincidentna zaštita znatno eliminiše kosmičko zračenje koje prodire u oba detektora. Takođe se smanjuje Comptonov kontinuum, pošto rasejani comptonovi zraci iz primarnog detektora dospevaju do sekundarnog detektora. Antikoincidentni detektor može biti bilo koji tip detektora (NaI scintilacioni, GM brojač, itd.).

Potrebno je naglasiti da se spektri nekih radio izotopa kao što je, na primer,  $^{60}\text{Co}$  koji se dobijaju pomoću ovakvih sistema ne mogu precizno analizirati, pošto se gama-zraci emituju u koincidenciji i na taj način interaguju u oba detektora. Ovakve dogadjaje antikoincidentno kolo odbacuje, a to dovodi do neželjene eliminacije nekih vrhova totalne apsorpcije (full-energy peaks).

### 3. OPIS SPEKTROMETARSKOG SISTEMA I GVOZDENE ZAŠTITE

#### 3.1. OSNOVNE KARAKTERISTIKE (Ge/Li//) SPEKTROMETARA

Razvojem poluporovodničke diskretne integralne elektronike, kao i tehnologije nuklearnih detektora poluprovodnički (Ge/Li//) spektrometri su danas postali najkvalitetniji uredjaji za merenje gama-zračenja.

Mehanizam detekcije poluprovodničkih detektora u mnogome podseća na mehanizam rada ionizacione komore, a zasniva se na tri efekta: fotoefektu, Comptonovom efektu, i efektu proizvodnje para. Prolaskom nuklearnog zračenja kroz osetljivu zapreminu detektora, a to je u slučaju poluprovodničkog detektora sloj prostornog nanelektrisanja ne kreiraju se laki i teški joni kao kod ionizacione komore nego par elektron - šupljina. Elektroni se kreću ka pozitivno polarisanom N-sloju i kada predaju svoja nanelektrisanja dobija se impuls čija je amplituda proporcionalna količini nanelektrisanja sakupljenih iz unutrašnjeg sloja, odnosno energiji gama-zračenja ostavljenoj u efikasnoj zapremini detektora.

Povećanje efikasne zapremine može se postići kompenzovanjem akceptorskih centara u P-tipu poluprovodnika driftovanjem jona litijuma (donorske nečistoće). Litijum u germaniju daje donorske nivoje, pa se koriste najpre za dobijanje PN-strukture, a zatim pod dejstvom jakog električnog polja litijumovi joni driftuju u P-deo kompenzujući akceptorске nečistoće i do debljine od nekoliko santimetara. Na ovaj način izmedju P i N dela stvoren je sloj koji ima osobine kristala bezprimesne čistoće. Pokretljivost litijumovih jona u germaniju je znatna pa se kristal germanijuma mora kontinualno održavati na temperaturama tečnog azota (77K). Praktično to se postiže postavljanjem detektora u vakuum kriostat koji

16.

obezbedjuje termalni kontakt germanijumovog kristala i rezervoara tečnog azota.

Jedna od dobrih karakteristika ovih detektora je odlična energetska rezolucija uz zadovoljavajuću efikasnost. Energetsku rezoluciju određuju faktori kao što su: niska energija koja je potrebna za proizvodnju elektron-šuljina kao i elektronski šumovi koji mogu poticati od samog detektora i pojačavačke opreme (ovi šumovi se mogu svesti na minimum izborom odgovarajuće elektronske opreme).

Energetska rezolucija ili moć razlaganja predstavlja sposobnost detektora da razlikuje dve energetski bliske linije:

$$R = \frac{\Delta E}{E}$$

Apsolutna efikasnost detektora je definisana kao:

$$\epsilon_{\text{aps.}} = \frac{N_{\text{det.}}}{N_{\text{emit.}}}$$

odnosno kao broj koji pokazuje koliki će broj emitovanih fotona biti registrovan u detektoru. Takođe se može definisati "intrinsična" efikasnost detektora, kao broj koji pokazuje koliki će broj upadnih fotona biti registrovan u detektoru:

$$\epsilon_{\text{int.}} = \frac{N_{\text{det.}}}{N_{\text{up.}}}$$

Za izotropan izvor veza između ove dve efikasnosti je sledeća:

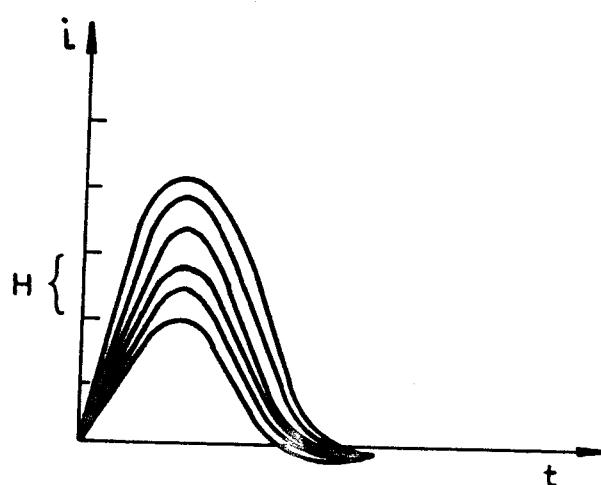
$$\epsilon_{\text{aps.}} = \epsilon_{\text{int.}} \cdot \frac{\Omega}{4\pi}$$

Intrinsična efikasnost zavisi prvenstveno od: materijala detektora, energije zračenja, i od fizičke debljine detektora u pravcu upadnog zračenja.

Ge/Li/ spektrometri predstavljaju linearne sisteme, a to znači da se energija gama-kvanata u kristalu linearno pretvara u električ-

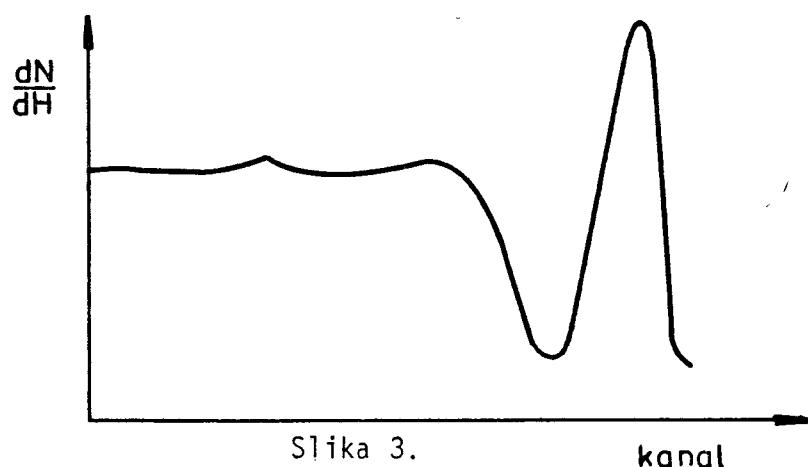
ne signale koji se dalje pojačavaju, beleže, sortiraju po visini i numerički obradjuju.

Analiza spektra koji dobijamo Ge/Li/ poluprovodničkim detektorom vrši se pomoću višekanalnog analizatora. Spektar koji dobijamo pomoću detektora prikazan je na slici 2.



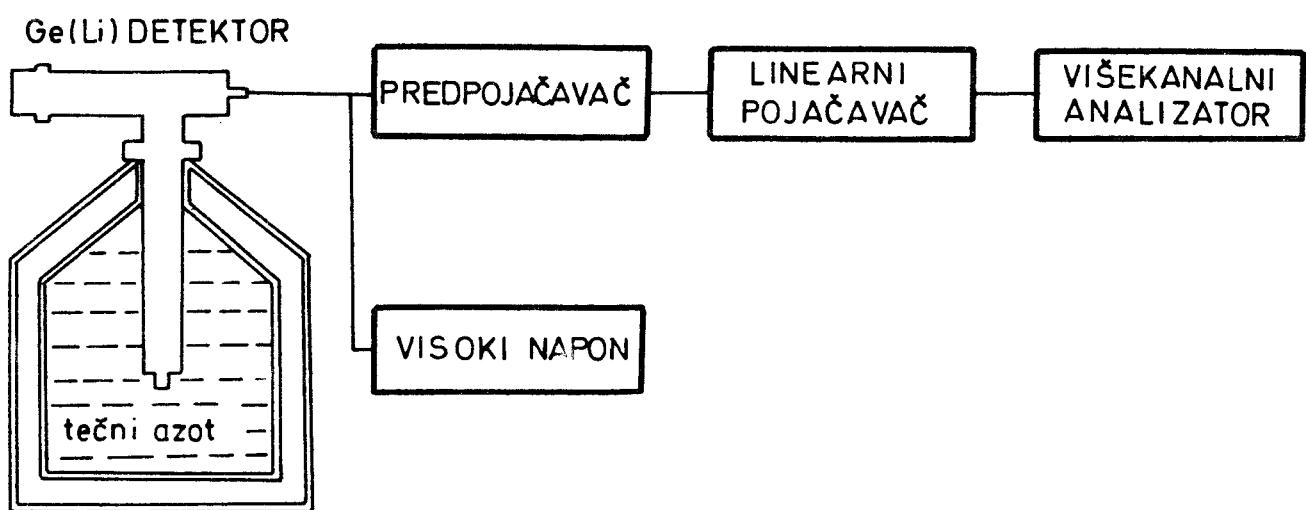
Slika 2.

Kao što se vidi, on se sastoji od niza krivih koje predstavljaju struju signala u vremenu. Svaka od ovih krivih potiče od pojedinačnih dogadjaja. Amplituda (visina) signala je funkcija upadne energije u detektoru. Kada se vrši analiza ovakvog spektra, višekanalnim analizatorom, visina impulsne ose je izdeljena u određeni broj kanala (prozora) širine  $H$  i višekanalni analizator beleži koliki broj signala pada unutar određjenog kanala. Posle ovakve analize dobijeni spektar (slika 3) predstavlja zavisnost broja signala unutar određene širine  $dN/dH$  u funkciji položaja kanala (svakom kanalu odgovara određena energija).



Slika 3.

Merni sklop Ge/Li/ spektrometarskog sistema je prikazan na slici 4.



Slika 4.

### 3.2. OPIS NISKOŠUMNE ZAŠTITE ZA Ge/Li/ SPEKTROMETAR

Zadatak ovog rada bio je ispitivanje niskošumne zaštite za merenje gama-aktivnosti prirodnih uzoraka. Visoko rezolucionna gama-spektrometrija ima tu osobinu da omogućuje simultanu identifikaciju i kvantitativno određivanje svih gama-emitera. S obzirom na probleme koji se javljaju pri merenju niskih aktivnosti niskošumna zaštita ne sme da sadrži dugoživeće fisione produkte.

### *Opis zaštitne komore*

Kao izolacioni materijal upotrebljeno je gvoždje koje je liveno pre II svetskog rata (ne sadrži fisione produkte koji potiču od nuklearnih eksplozija).

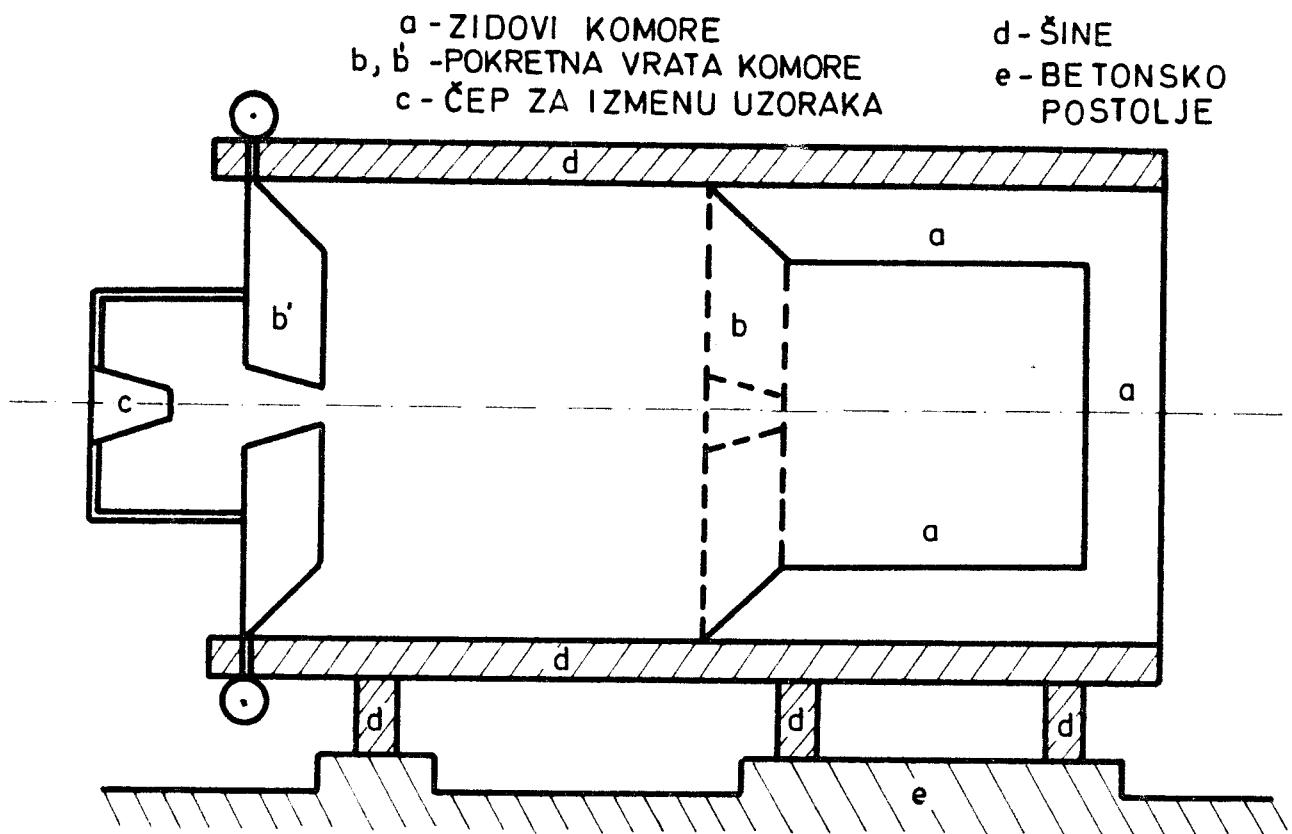
Komora je izradjena od gvozdenog lima debljine 1 cm. Ploče su od površinske kontaminacije očišćene peskarenjem, a zatim ispravljene i oblikovane. Kompletna montaža komore izvršena je bez varenja. Zbog toga je najpogodnije bilo izraditi komoru u obliku kocke sa bočnim pomičnim vratima za pristup detektoru i posebnim vratima za izmenu uzoraka. Zidovi komore su debljine 25 cm dok korisna zapremina iznosi  $1 \text{ m}^3$ . Ukupna masa komore je 20 tona.

Pokretna vrata se pokreću na željezničkim šinama. Na njima se nalaze kružna vrata ( $\phi=15 \text{ cm}$ ) za postavljanje uzoraka koje merimo. Cela komora je uzdignuta sa betonskog postolja na visini od 0,5 m pomoću nosača izvedenih od starih željezničkih šina. Na taj način, izbegnuto je zračenje podlove. Na zidovima komore nalaze se samo otvori za dolivanje tečnog azota u Dewarov sud ( $\phi=20 \text{ mm}$ ) za vodjenje električnih kablova ( $\phi = 15 \text{ mm}$ ) i dva ventilaciona otvora ( $\phi=20 \text{ mm}$ ) radi sprečavanja izotopske frakcionacije u komori.

Da bi zaštitna komora mogla da primi različite detektore, a bez dodatne adaptacije detektor je zajedno sa Dewarovim sudom smešten u komoru, što je zahtevalo da komora ima veliku korisnu zapreminu. Nedostaci ovakvog rešenja (aktivnost iz Dewarovog suda nije izolovana, velika količina radona u komori, detektor "gleda" na veliku površinu) mogu se eliminisati kao što je planirano dodatkom antikoincidentne zaštite, ili sloja čistog izolacionog materijala oko kristala kao i rešavanjem problema ventilaracije komore da bi se sprečila izotopska frakcionacija u komori.

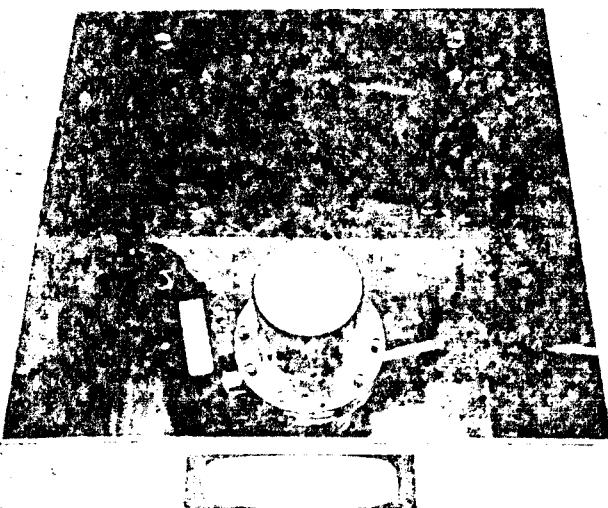
Za lokaciju komore izabrana je prostorija u zgradici Instituta za fiziku koja je udaljena od svih izvora zračenja i u kojoj nije radjeno sa radioaktivnim izotopima. Presek komore je prikazan na slici 5.

20.

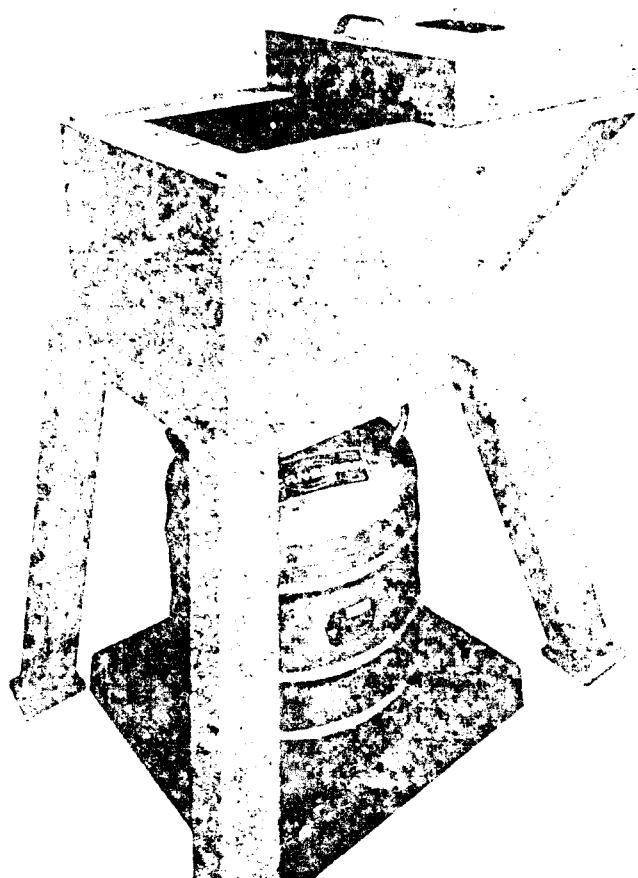


Slika 5.

Na slikama 6. i 7 (kao primer) predstavljena je još jedna mogućnost konstrukcije zaštite (Canberra Industries) sa svojim karakteristikama:



Slika 6.



Slika 7.

Karakteristike ove zaštite kao i Ge/Li/ detektora su sledeće:

Unutrašnje dimenzije	30,5 cm x 30,5 x 40,5 cm
Debljina zidova	10 cm
Materijal	staro gvoždje (od pre II svetskog rata)
Relativna efikasnost	12%
Rezolucija	1,95 keV FWHM = 1.33 MeV 0,90 keV FWHM = 122 keV

Odbroj "fona": 2,25 odbroja u sekundi u energetskom intervalu 50 keV do 2,7 MeV.

22.

Osetljivost: Uzimajući u obzir grešku od 50%, vreme merenja od 50.000 sekundi kao i udaljenost tačkastog izvora - detektor od 1 cm odredjene su sledeće osetljivosti za pojedine radio izotope:

<u>Radioizotop</u>	<u>Energija</u>	<u>Osetljivost</u>
$^{57}\text{Co}$	122 keV	2 pCi
$^{139}\text{Ce}$	165 keV	3 pCi
$^{137}\text{Cs}$	662 keV	6 pCi
$^{60}\text{Co}$	1332 keV	10 pCi

## 4. ISTRAŽIVANJE STRUKTURE FONA

Merenja performansi komore su izvedena pomoću Ge/Li/ spektrometra. Kristal germanijuma se stalno održava na temperaturi tečnog azota, a PN spoj ove diode je inverzno polarisan pri radu sa naponom od 3.500 V. Efikasnost detektora iznosi 13,7% (u odnosu na scintilacioni detektor NaI(Tl) "3x3" na udaljenosti izvora od 25 cm), a moć razlaganja (FWHM) 1,89 keV.

### 4.1. REZULTATI MERENJA SA KOMENTARIMA

Ispitivanje kvaliteta zaštitne komore i prisustva radioaktivnih primesa u zaštitnom materijalu vršena su komparativnom metodom. To znači da su merenja vršena direktnim uporedjivanjem gama-spektara merenih detektorom smeštenim izvan komore i detektorom u komori.

Ova komparativna merenja su vršena diferencijalno (za najintenzivnije linije zračenja pozadine) i integralno (po određenim energetskim oblastima). Pri određivanju relativnih intenziteta gama-prelaza služile su površine pod vrhovima spektralnih linija.

Određivanje površine pod vrhovima je izvršeno tako što je izračunata suma odbroja  $N_p$  u kanalima koji se nalaze u domenu spektralne linije. Sa  $N_p$  je određena cela površina pod vrhom tako da od nje treba oduzeti površinu koja ne pripada posmatranom vrhu, tj. površinu fona.

Površina fona je izračunata tako što je uzeto nekoliko simetričnih tačaka u odnosu na spektralnu liniju a koje nisu u domenu vrha i izračunat je odbroj:

$$N_f(m) = \frac{N_{fL} + N_{fD}}{2}$$

24.

$N_f(m)$  određuje površinu fona za  $m$  kanala, Deo površine koji potiče od fona je:

$$N_f = n \cdot \frac{N_f(m)}{m} = n \cdot N_{fS}$$

gde je  $n$  - broj kanala pod vrhom.

Tražena površina vrha je izražena formulom:

$$A = N_p - N_f$$

ova površina je određena sa greškom:

$$\Delta A = \pm \sqrt{A + n(1 + \frac{n}{m}) \cdot N_{fS}}$$

Integralna merenja su vršena u energetskom intervalu od 0,025 Mev do 6 Mev. Rezultati ovih merenja su prikazani u tabeli I.

Iz tabele I vidimo da je faktor redukcije za celu energetsku oblast (0,023 do 6 Mev) 90. U energetskom intervalu od 0,023 do 2,7 Mev, koji je od praktičnog interesa detektor u komori ima fon od 1,06 Imp/s.

TABELA I - Rezultati integralnih merenja

En.opseg (Mev)	Broj impulsa u 200 ks		Faktor redukcije 1/2
	1) van komore	2) u komori	
0,023 - 6	19940710	223456	89,2
0,023 - 2,7	19922000	212000	93,9
0,4 - 6	3586958	59731	60
0,55 - 6	2574102	45325	57
1 - 6	1104839	28632	39
1,5 - 6	323307	19170	17
2 - 6	151967	14448	10
2,7 - 6	18138	1053	2

U tabeli II prikazani su rezultati integralnih merenja sa detektorom u komori kod koje su svi kružni otvori zatvoreni olovom. Ova merenja su vršena u energetskom opsegu od 0,05 do 2,9 Mev. Integralni odbroj u komori u oblasti od 0,023 do 2,9 Mev smanjen je na vrednost 0,95 Imp/s. Faktor redukcije u poređenju sa faktorom redukcije u komori sa kružnim otvorima u ovoj oblasti iznosi 105, znači da je fon redukovana za ~ 15%.

TABELA II - Rezultati integralnih merenja

En.opseg (Mev)	Broj impulsa u 200 ks
0,05 - 2,9	190272
0,1 - 2,9	160925
0,2 - 2,9	100230
0,3 - 2,9	67142
0,55 - 2,9	36487
1 - 2,9	18890
1,5 - 2,9	10292
2 - 2,9	5587

Diferencijalna analiza spektra vršena je utvrđivanjem energija gama linija, a zatim identifikacijom odgovarajućih elemenata.

U analizi su najpre odredjeni položaji svih vrhova u spekturu i odredjeni njihovi intenziteti. Na osnovu energetske kalibracije pomoću standardnih kalibracionih izvora odredjene su energije svih vrhova u spekturu. Pomoću tablice izotopa najpre su za svaki pojedini vrh odredjeni svi mogući izotopi, a potom je na osnovu postojanja drugih vrhova mogućih izotopa i njihovih relativnih intenziteta tačno odredjen izotop kome pripada odgovarajući vrh.

Podaci za ove vrhove registrovani sa detektorom izvan i unutar komore su prikazani u tabeli III i IV. Spektri fona dobijenih sa detektorom smeštenim izvan i u komori dati su u prilogu II.

TABELA III - Rezultati merenja sa detektorom smeštenim izvan komore.

Izotop	E(keV)	Broj impulsa u 200 ks			Izotop	E(keV)	Broj impulsa u 200 ks		
		N <sub>p</sub>	N <sub>f</sub>	A=N <sub>p</sub> -N <sub>f</sub>			N <sub>p</sub>	N <sub>f</sub>	A=N <sub>p</sub> -N <sub>f</sub>
<sup>212</sup> Pb	239	466365	408939	57426	<sup>214</sup> Pb	295	268950	251584	17366
<sup>228</sup> Ac	339	160203	149796	10407	<sup>214</sup> Pb	352	204748	166305	38443
<sup>228</sup> Ac	463	101746	98565	3181	<sup>208</sup> Tl	583	91705	67993	23712
<sup>214</sup> Bi	609	96352	60198	36154	<sup>137</sup> Cs	662	55873	52292	3581
<sup>212</sup> Bi	728	51193	46041	5152	<sup>214</sup> Bi	768	46330	41573	4757
<sup>228</sup> Ac	795	33687	30812	3055	<sup>208</sup> Tl	860	37030	34175	2855
<sup>228</sup> Ac	911	50858	32298	18560	<sup>214</sup> Pb	933	32181	30167	2014
<sup>228</sup> Ac	969	43588	29059	14529	<sup>214</sup> Bi	1120	36273	26088	10185
<sup>214</sup> Bi	1154	27097	25936	1161	ANIH:	511	98885	83828	15057
<sup>214</sup> Bi	1238	29944	24488	5456	<sup>214</sup> Bi	1376	13788	11489	2299
<sup>214</sup> Bi	1407	15415	12965	2450	<sup>40</sup> K	1461	103790	8789	95001
<sup>228</sup> Ac	1495	7118	6348	770	<sup>214</sup> Bi	1509	7968	6348	1620
<sup>208</sup> Tl	1591	11511	5178	6333	<sup>212</sup> Bi	1620	5971	1748	4223
<sup>214</sup> Bi	1661	5050	4561	489	<sup>214</sup> Bi	1729	5718	3944	1774
<sup>214</sup> Bi	1764	13423	3817	9606	<sup>214</sup> Bi	1847	4901	3629	1272
<sup>208</sup> Tl	2103	6005	3050	2955	<sup>214</sup> Bi	2117	3803	3140	663
<sup>214</sup> Bi	2204	5812	3100	2712	<sup>214</sup> Bi	2449	2538	1807	731
<sup>208</sup> Tl	2615	20228	502	19726					

TABELA IV - Rezultati merenja sa detektorom smeštenim u komori

Izotop	E(keV)	Broj impulsa u 200 ks		
		N <sub>p</sub>	N <sub>f</sub>	A = N <sub>p</sub> - N <sub>f</sub>
<sup>226</sup> Ra	185	9073	7580	1493
<sup>212</sup> Pb	239	5705	4870	835
<sup>214</sup> Pb	295	3503	3216	287
<sup>214</sup> Pb	352	2905	2273	632
ANIH:	511	2755	1277	1478
<sup>208</sup> Tl	584	987	886	101
<sup>214</sup> Bi	609	1217	766	451
<sup>228</sup> Ac	911	562	455	107
<sup>228</sup> Ac	969	418	350	68
<sup>214</sup> Bi	1120	349	264	85
<sup>40</sup> K	1461	305	162	143
<sup>214</sup> Bi	1764	191	123	68
<sup>208</sup> Tl	2615	149	75	74

Izotop	E(keV)	Broj impulsa u 80 ks		
		N <sub>p</sub>	N <sub>f</sub>	A=N <sub>p</sub> -N <sub>f</sub>
<sup>212</sup> Pb	239	1267	954	313
<sup>228</sup> Ac	339	427	385	42
<sup>214</sup> Pb	352	645	439	206
<sup>228</sup> Ac	463	268	263	5
ANIH:	511	779	243	536
<sup>214</sup> Bi	610	338	164	174
<sup>228</sup> Ac	911	93	66	27
<sup>228</sup> Ac	969	83	74	9
<sup>40</sup> K	1461	97	33	64

\* Detektor u komori (svi kružni otvori zatvoreni olovom)

Iz tabele III i IV vidimo da su registrovani vrhovi koji potiču od prirodnih radioaktivnih izotopa. Ovu prirodnu radioaktivnost čine članovi koji potiču iz radioaktivnih familija urana, torijuma i aktinijuma, te izotop  $^{40}\text{K}$ . Ovo nam potvrđuje da materijal komore ne sadrži tragove veštačkih radioizotopa. Faktori redukcije za najintenzivnije linije iz prirodne aktivnosti date su u tabeli 5.

TABELA V - Faktori redukcije za najintenzivnije linije iz prirodne aktivnosti

Izotop	E(kev)	Broj impulsa u 200 ks 1) van komore	2) u komori	3) u komori*	$R_1$ $1/2$	$R_2$ $1/3$
$^{212}\text{Pb}$	239	57426	835	313	68	73
$^{214}\text{Pb}$	295	17366	287		60	
$^{214}\text{Pb}$	352	38443	632	206	61	75
ANIH:	511	15057	1478	536	10	11
$^{208}\text{Tl}$	584	23712	101		234	
$^{214}\text{Bi}$	609	36154	451	174	80	83
$^{228}\text{Ac}$	911	18560	107	27	173	275
$^{228}\text{Ac}$	969	14529	68	9	213	645
$^{214}\text{Bi}$	1120	10185	85		120	
$^{40}\text{K}$	1461	95001	143	64	664	593
$^{214}\text{Bi}$	1764	9606	68		141	
$^{208}\text{Tl}$	2615	19726	74		266	

\* u komori (svi kružni otvori zatvoreni olovom).

Na osnovu faktora redukcije linije  $^{40}\text{K}$  ( $E = 1461 \text{ keV}$ ) izračunata je efektivna debljina zaštite, a odatle i teorijski faktori redukcije:

$$R = \frac{A_1}{A_2} = \frac{95001}{143} = 664 \quad \mu(E = 1461 \text{ keV}) = 0,39 \text{ cm}^{-1}$$

$$X = \frac{1}{\mu} \ln \frac{A_1}{A_2} = 16,7 \text{ cm}$$

Ovi rezultati su prikazani u tabeli VI.

TABELA VI - Faktori redukcije (izračunato)  $X = 16,7$  cm

$E$ (kev)	$\mu$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	$I_0/I$
100	2,82	$3 \cdot 10^{20}$
200	1,13	$1,56 \cdot 10^8$
300	0,85	$1,5 \cdot 10^6$
400	0,73	$197 \cdot 10^3$
500	0,66	$61 \cdot 10^3$
600	0,60	$225 \cdot 10^3$
700	0,56	$11,5 \cdot 10^3$
800	0,52	5907
900	0,5	4230
1000	0,47	2563
1200	0,43	1314
1400	0,40	796
1600	0,37	482
2000	0,33	247
2600	0,30	150
3000	0,28	107

Poredjenjem faktora redukcije dobijenih eksperimentalno (tabela V) sa teorijskim (tabela VI), vidi se da eksperimentalno dobijeni faktori redukcije ne prate jaku energetsku zavisnost koeficijenta totalne apsorpcije gama-zračenja.

Ovo nam direktno pokazuje da se izvori zračenja ne nalaze izvan komore (osim  $^{40}\text{K}$ ) ni u materijalu zaštite, nego najvećim delom potiču od gasovitih članova radioaktivnih nizova U i Th (prilog I).

U cilju ispitivanja radioaktivnosti reke Dunava vršena su merenja fona unapred predvidjenih radioizotopa i rezultati ovih merenja su prikazani u tabeli VII.

TABELA VII - Rezultati merenja sa detektorom u komori sa nosačem uzorka

Izotop	E(keV)	Broj impulsa u 80 ks			Broj impulsa u 200 ks		
		N <sub>p</sub>	N <sub>f</sub>	A=N <sub>p</sub> - N <sub>f</sub>	N <sub>p</sub>	N <sub>f</sub>	A=N <sub>p</sub> - N <sub>f</sub>
<sup>144</sup> Ce	133	1915	1924	- 9	5765	5739	26
<sup>214</sup> Pb	295	704	670	34	2340	1867	473
<sup>214</sup> Pb	352	619	439	180	1987	1317	670
<sup>125</sup> Sb	428	287	295	- 8	928	865	63
<sup>7</sup> Be	478	208	252	-44	745	760	-15
<sup>103</sup> Ru	497	237	254	-17	696	627	69
<sup>125</sup> Sb	600	143	143	0	496	485	11
<sup>214</sup> Bi	609	283	143	140	850	485	365
<sup>106</sup> Ru	622	156	142	14	408	485	-77
<sup>137</sup> Cs	662	128	130	- 2	394	380	14
<sup>95</sup> Zr	724	124	108	16	341	363	-22
<sup>95</sup> Zr	757	115	89	26	318	320	- 2
<sup>95</sup> Nb	766	120	89	31	343	320	23
<sup>134</sup> Sc	796	93	105	-12	317	283	34
<sup>228</sup> Ac	911	118	73	45	357	234	123
<sup>228</sup> Ac	969	85	66	19	274	210	64
<sup>60</sup> Co	1173	64	57	7	157	162	- 5
<sup>60</sup> Co	1333	42	32	10	156	111	45
<sup>40</sup> K	1461	101	42	59	266	128	138
ANIH:	511	825	261	564	2099	627	1472

## 4.2. ODREĐIVANJE MINIMALNE AKTIVNOSTI

Radioaktivni raspad je slučajan proces, i kao takav on ima statistički karakter. Merenja koja se baziraju na posmatranju emitovanog zračenja pri nuklearnom raspadu, uključuju izvestan stepen statističkih fluktuacija koje predstavljaju neizbežan izvor nejasnoća, nepreciznosti ili greške pri merenju.

Statistika brojanja (counting statistics) podrazumeva statističku analizu rezultata koji se dobijaju pri nuklearnim merenjima, kao i predviđanje očekivane preciznosti i tačnosti veličina koje se dobijaju iz eksperimenta.

Preciznost, a samim tim i osjetljivost merenja određena je Poissonovom greškom, na koju bitno utiče pozadinsko zračenje tj. odbroj u pozadinskom zračenju i koja zavisi od ukupnog odbroja izvora. Definisacemo sledeće veličine:

- S - odbroj koji potiče od samog izvora,
- B - odbroj koji potiče od fona (pozadinsko zračenje),
- $T_{S+B}$  - vreme merenja samog izvora,
- $T_B$  - vreme merenja fona,
- $\delta = \sigma_S/S$  - relativna standardna devijacija u odbroju koji potiče od izvora (S).

Standardna devijacija  $\sigma_S$  je data sledećom formulom:

$$\sigma_S = \sqrt{\frac{S+B}{T_{S+B}} + \frac{B}{T_B}} \quad 4.1.$$

Definisacemo ukupno vreme merenja:  $T = T_{S+B} + T_B$ . Pomoću jednačine 4.1. može se naći uslov da za datu preciznost merenja ovo vreme postane minimalno:

$$\sigma_S^2 = \frac{S+B}{T_{S+B}} + \frac{B}{T_B}$$

$$2\sigma_S d\sigma_S = -\frac{S+B}{T_{S+B}^2} dT_{S+B} - \frac{B}{T_B^2} dT_B = 0$$

(pošto je  $T=\text{const.}$  sledi  $dT_{S+B} + dT_B = 0$ ).

Odayde vidimo da T postaje minimalno ako je:

$$\frac{T_{S+B}}{T_B} = \sqrt{\frac{S+B}{B}} \quad 4.2.$$

Kao procena kvaliteta mernog sistema definisana je veličina koja je inverzno proporcionalna veličini  $T$ , tj. vremenu koje je potrebno da se postigne data statistička preciznost u ukupnom odboru. Ova veličina se naziva FOM (figure of merit) a izrežane je kao:

$$\frac{1}{T} = \delta^2 \cdot \frac{S^2}{(\sqrt{S+B} + \sqrt{B})^2} \quad 4.3.$$

Od interesa su sledeći slučajevi:

1) Ukupan odbor je mali u poređenju sa odborom fona, tj.  $S \ll B$ , što je slučaj kod niskošumnih merenja, tada je  $1/T \sim \delta^2 \cdot S^2 / 4B$ .

2) Ukupan odbor  $S \gg B$ , fon tada ne utiče na statističku grešku i  $1/T \sim \delta^2 \cdot S$ .

Kod niskošumnih merenja FOM, tj.  $1/T$  je dato kao  $S^2 / 4B$ . FOM sistema se može poboljšati ili smanjenjem pozadinskog zračenja, ili povećanjem apsolutne efikasnosti brojanja, odnosno korišćenjem većih uzoraka. U slučaju niskošumnih merenja količina uzorka (sa aktivnošću  $A$ ) je ograničena tako da FOM postaje  $\epsilon^2 A^2 / 4B$ , gde je  $\epsilon$  efikasnost brojanja.

Prema jednačini 4.3. može se izračunati minimalni odbor uzorka  $S$ , da bi se postiglo merenje date preciznosti  $\delta$  u vremenu  $T$  i u prisustvu pozadinskog zračenja  $B$ :

$$S = \frac{1}{\delta \sqrt{T}} + 2 \sqrt{B} / \delta \sqrt{T} \quad 4.4.$$

Na osnovu rezultata merenja fona u komori (svi kružni otvori zatvoreni olovom) izračunate su granice detekcije za fisione i korozione produkte koji se mogu javiti kao zagadjivači od nuklearnih elektrana, korišćenjem jednačine:

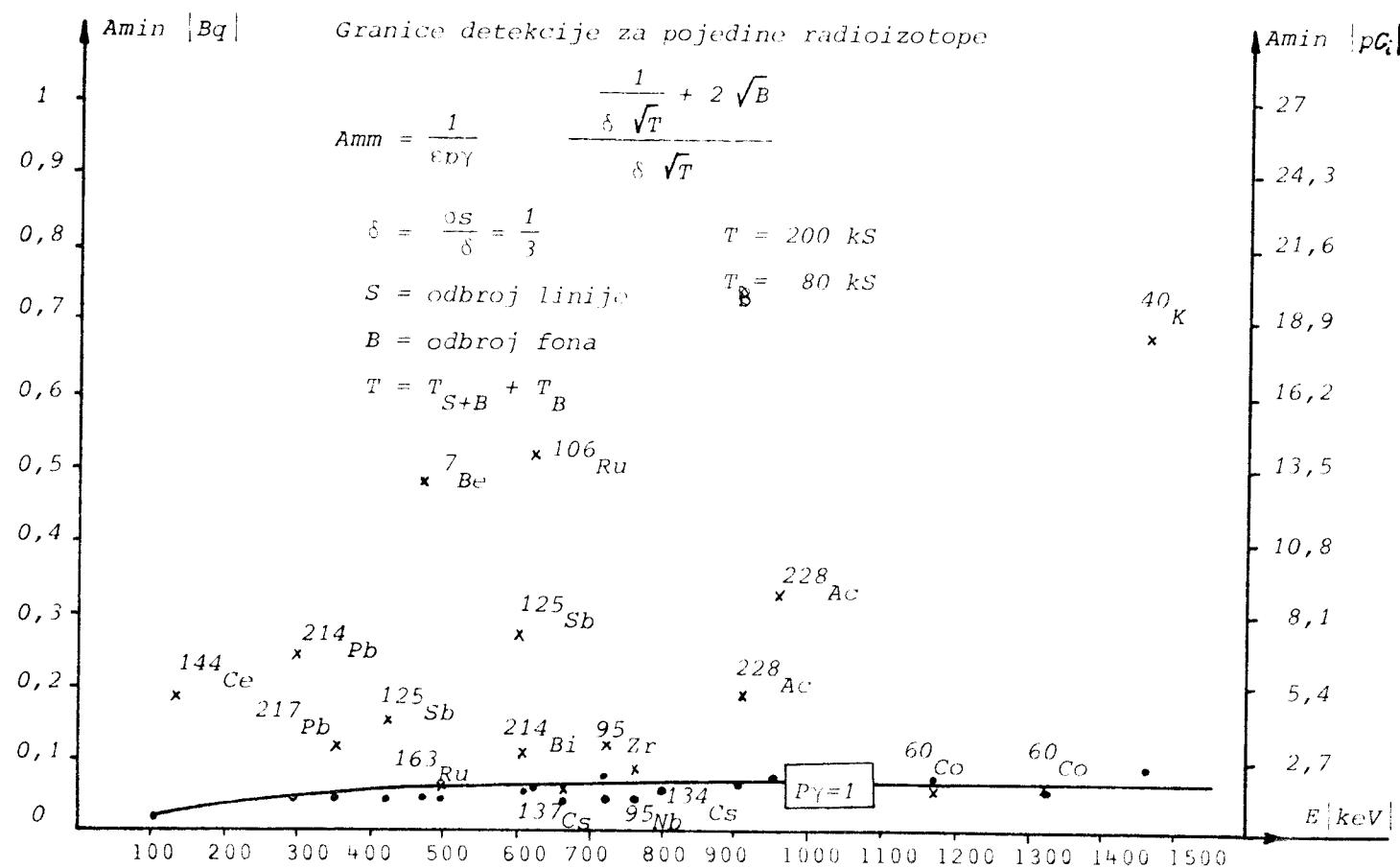
$$A_m = \frac{1}{\epsilon \cdot p_\gamma} \cdot \frac{(\delta \sqrt{T})^2 + 2 \sqrt{B}}{\delta \sqrt{T}}$$

gde je:  $\epsilon$  - efikasnost detektora,  
 $p_\gamma$  - broj emitovanih gama kvanata po raspadu,  
 $\delta = \sigma_S/S = 1/3$   
 $B$  - odbroj fona na mestu datog vrha.

Ovi rezultati su prikazani u tabeli VIII i na grafiku 1.

TABELA VIII - Granice detekcije za fisione i korozione produkte

Izotop	e(keV)	$A_m(B_q)$	$p_\gamma(\%)$
$^{144}\text{Ce}$	133	0,185	11,1
$^{214}\text{Pb}$	295	0,24	18,9
$^{214}\text{Pb}$	352	0,12	36,7
$^{125}\text{Sb}$	428	0,153	30
$^7\text{Be}$	478	0,47	10,3
$^{103}\text{Ru}$	497	0,06	86,4
$^{125}\text{Sb}$	600	0,27	17,9
$^{214}\text{Bi}$	609	0,108	46
$^{106}\text{Ru}$	622	0,52	9,8
$^{137}\text{Cs}$	662	0,06	85
$^{95}\text{Zr}$	724	0,12	44,2
$^{95}\text{Zr}$	757	0,09	34,6
$^{95}\text{Nb}$	766	0,05	99,8
$^{134}\text{Cs}$	796	0,067	85,4
$^{228}\text{Ac}$	911	0,19	27
$^{228}\text{Ac}$	969	0,33	16
$^{60}\text{Co}$	1173	0,067	99,9
$^{60}\text{Co}$	1333	0,062	99,9
$^{40}\text{K}$	1461	0,68	10,7



Grafik 1.

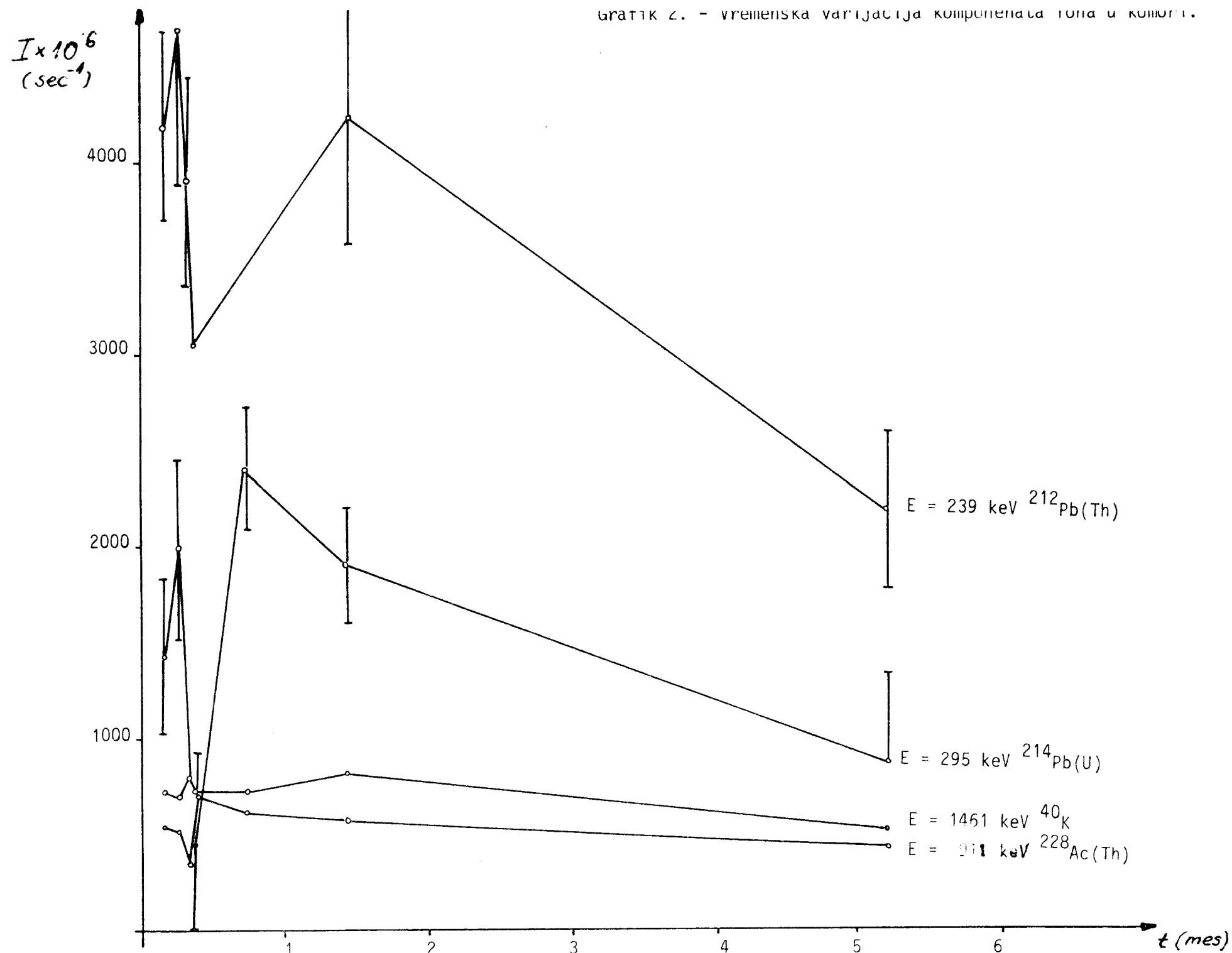
#### 4.3. ISPITIVANJE VARIJACIJE FONA

Pri merenju niskih aktivnosti, kao poseban problem javlja-ju se nepredvidljive i dugoročne varijacije fona. Ove nestatističke pro-mene mogu biti prouzrokovane: varijacijom fluksa kosmičkog zračenja, izo-topske frakcionacije u blizini detektora (izdvajanje radioaktivnog gasa radona) i parazitnim električnim impulsima.

Zaštita od ovakvih uticaja može se postići ograničavanjem trajanja vremena merenja, dok u slučaju varijacija koje su prouzrokovane izotopskom frakcionacijom u vidu izdvajanja radioaktivnog gasa radona za-štita se može postići obezbedjenjem ventilacije oko detektora, mada i ta-da treba očekivati varijacije od nekoliko procenata.

Ovi rezultati su prikazani na grafiku 2. Iz navedenih re-zultata ne može se zaključiti da postoje veće vremenske varijacije fona.

GRATIK 2. - VREMENSKA VARIJACIJA KOMPONENTA TOLA U KOMORI.



## 5. ZAKLJUČAK

Na osnovu dobijenih rezultata, vidimo da se ovakvim načinom zaštite okoline postiže znatna redukcija u pozadinskom zračenju koja ne potiče od samog materijala zaštite (faktor redukcije linije  $^{40}\text{K}$  ~ 700). Da bi zaštitna komora mogla da primi bez dodatne adaptacije različite detektore i dodatne elemente zaštite komora ima veliku efikasnu zapreminu i masu. Usled toga se u spektru zapaža vrlo intenzivna linija koja potiče od procesa anihilacije. Nedostaci komore kao što je velika količina rada na u komori mogu se rešiti obezbeđenjem ventilacije i filtracije vazduha, kao i prođuvavanjem gasovitog azota. Ovakav način zaštite može se poboljšati dodatnom pasivnom zaštitom detektora unutar komore (elektrolitički bakar) kao i antikoincidentnom zaštitom (NaI detektor).

## 6, R E F E R E N C E

1. L.Marinkov

*Osnovi nuklearne fizike, PMF Novi Sad, 1976.*

2. H.Oeschger and M.Wahlen

*Physikalisches Institut, Universität Bern, Bern, Switzerland  
Low level counting techniques, 1975, Ann.Rev. of Nucl.Sci.*

3. M.Vesković

*Diplomski rad, PMF Novi Sad, 1981.*

4. Glenn F. Knoll

*Radiation Detection and Measurement, John Wiley & Sons, Inc., 1979.*

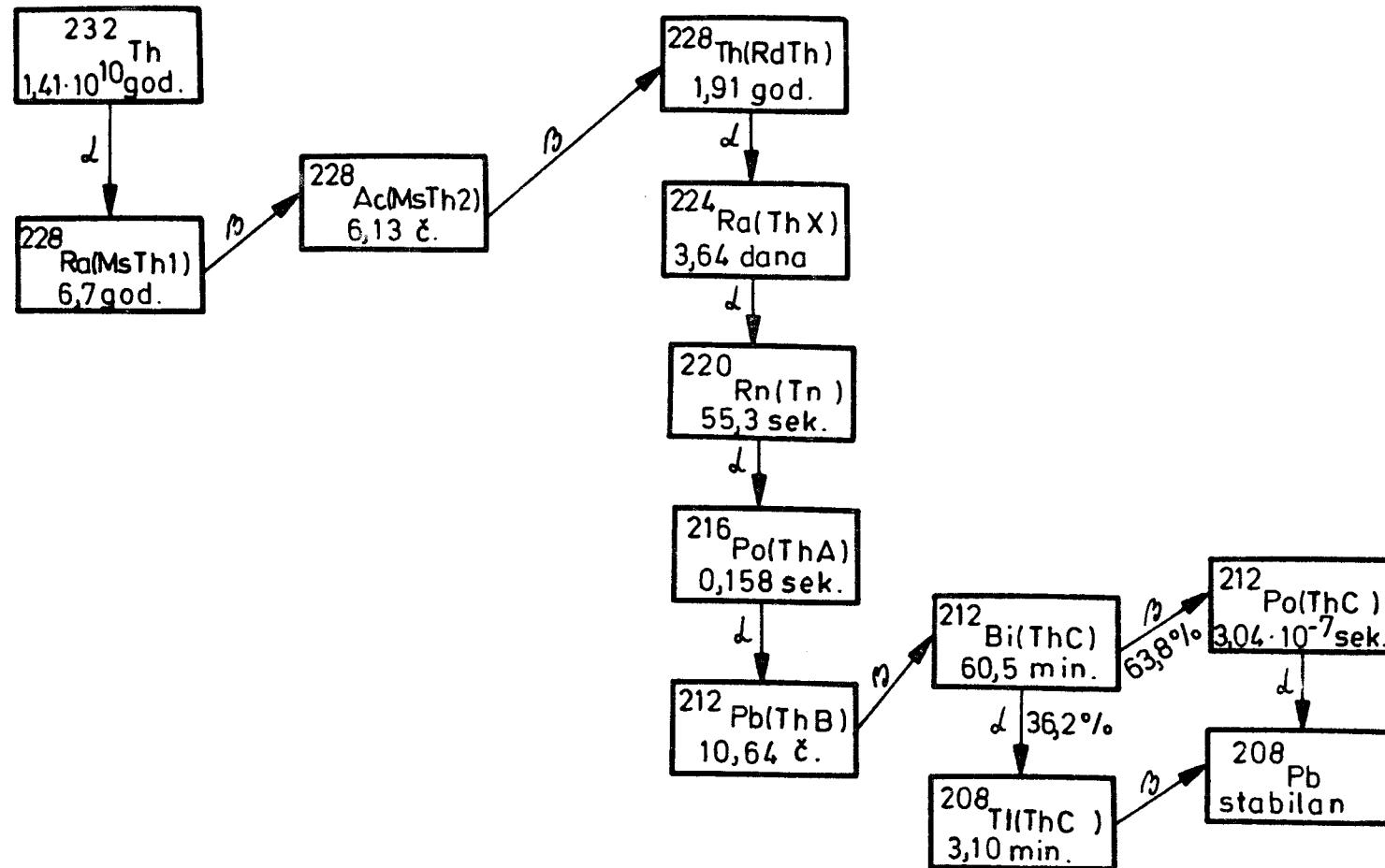
5. Herbert Inhaber

*Physics of the Environment, Ann Arbor Science Publishers, Inc. 1978.*

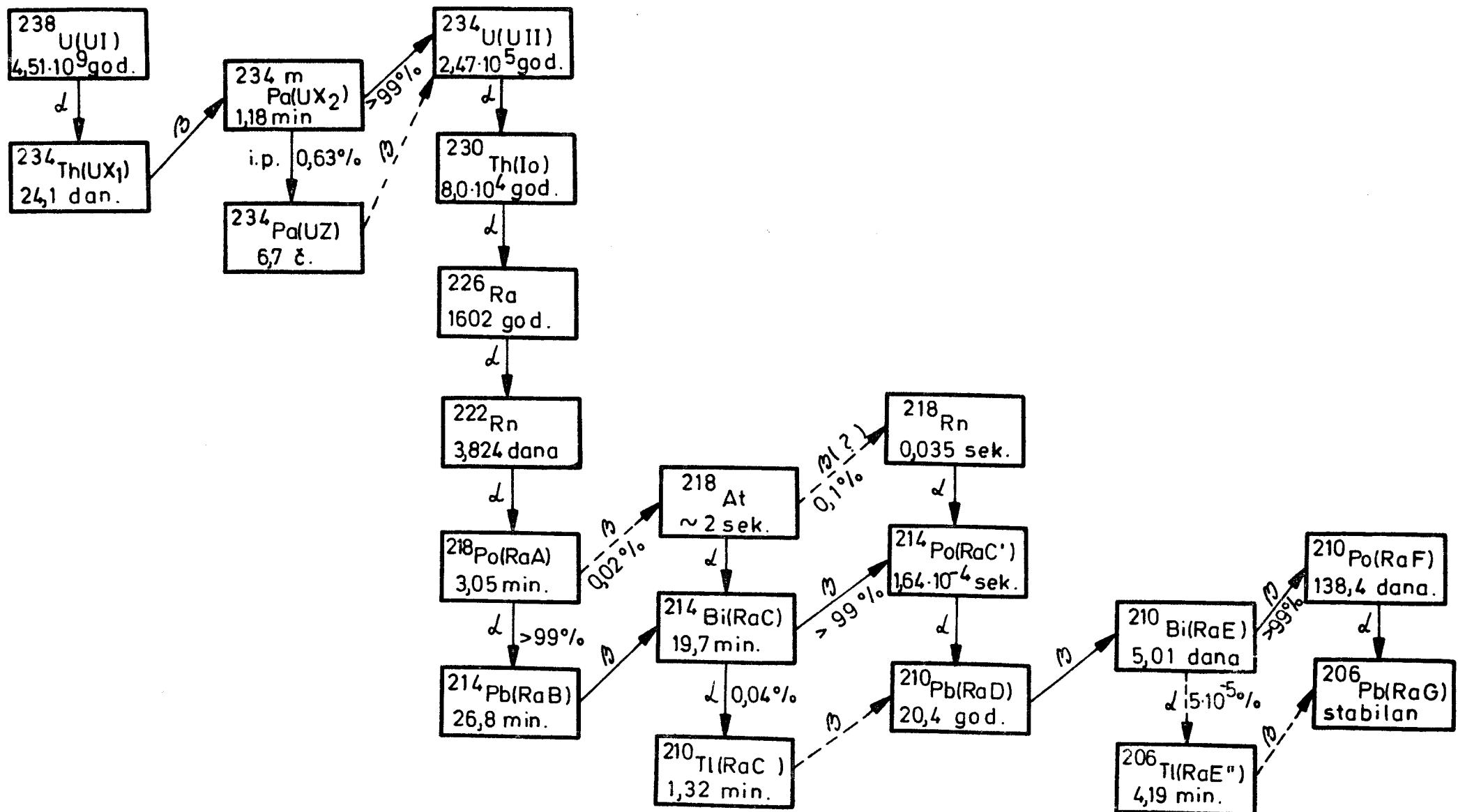
6. Adams and Dams

*Applied Gamma-ray Spectrometry, Argone, Argone Nat.Lab., 1975.*

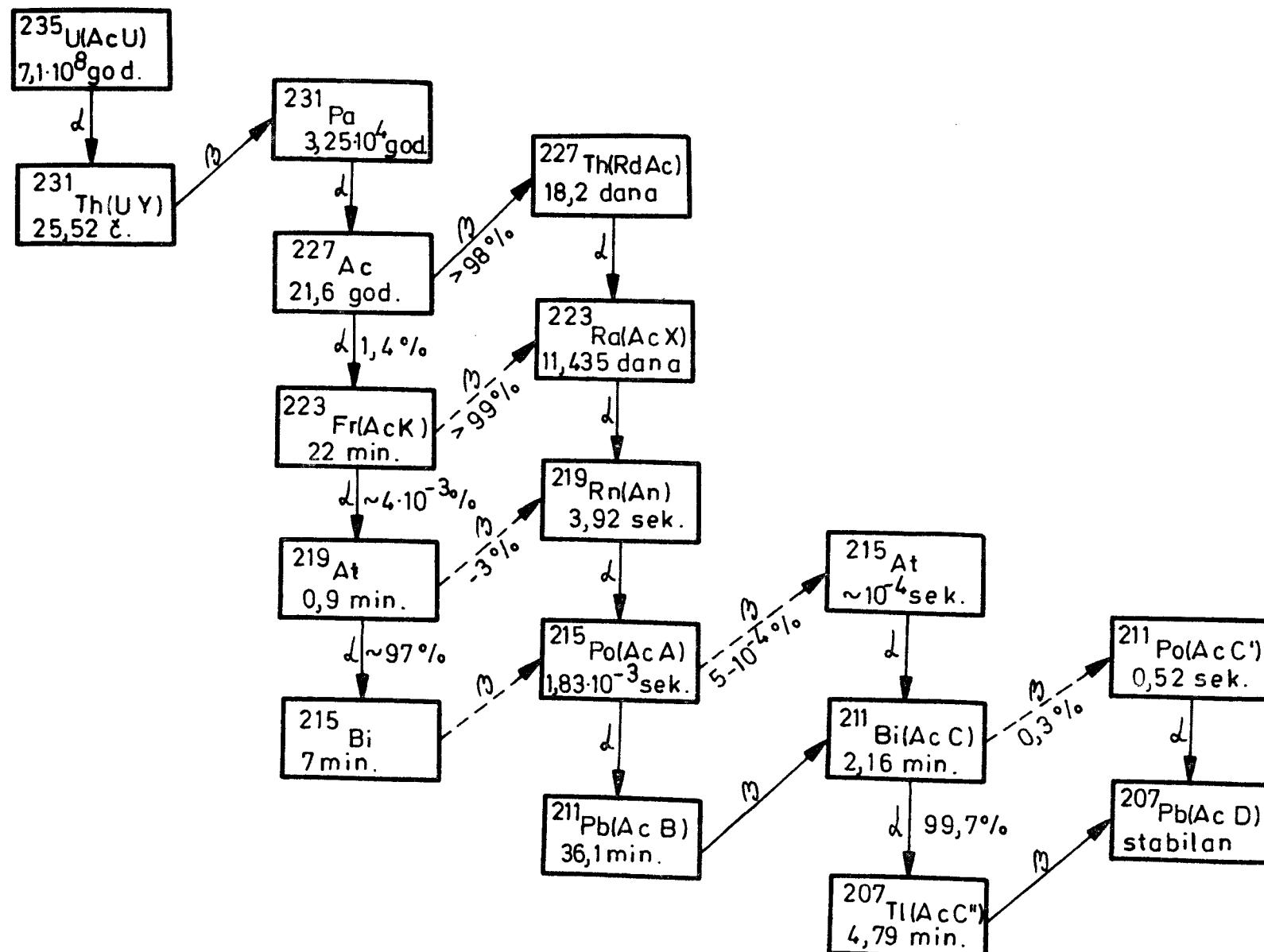
## PRILOG I - RADIOAKTIVNE FAMILIJE



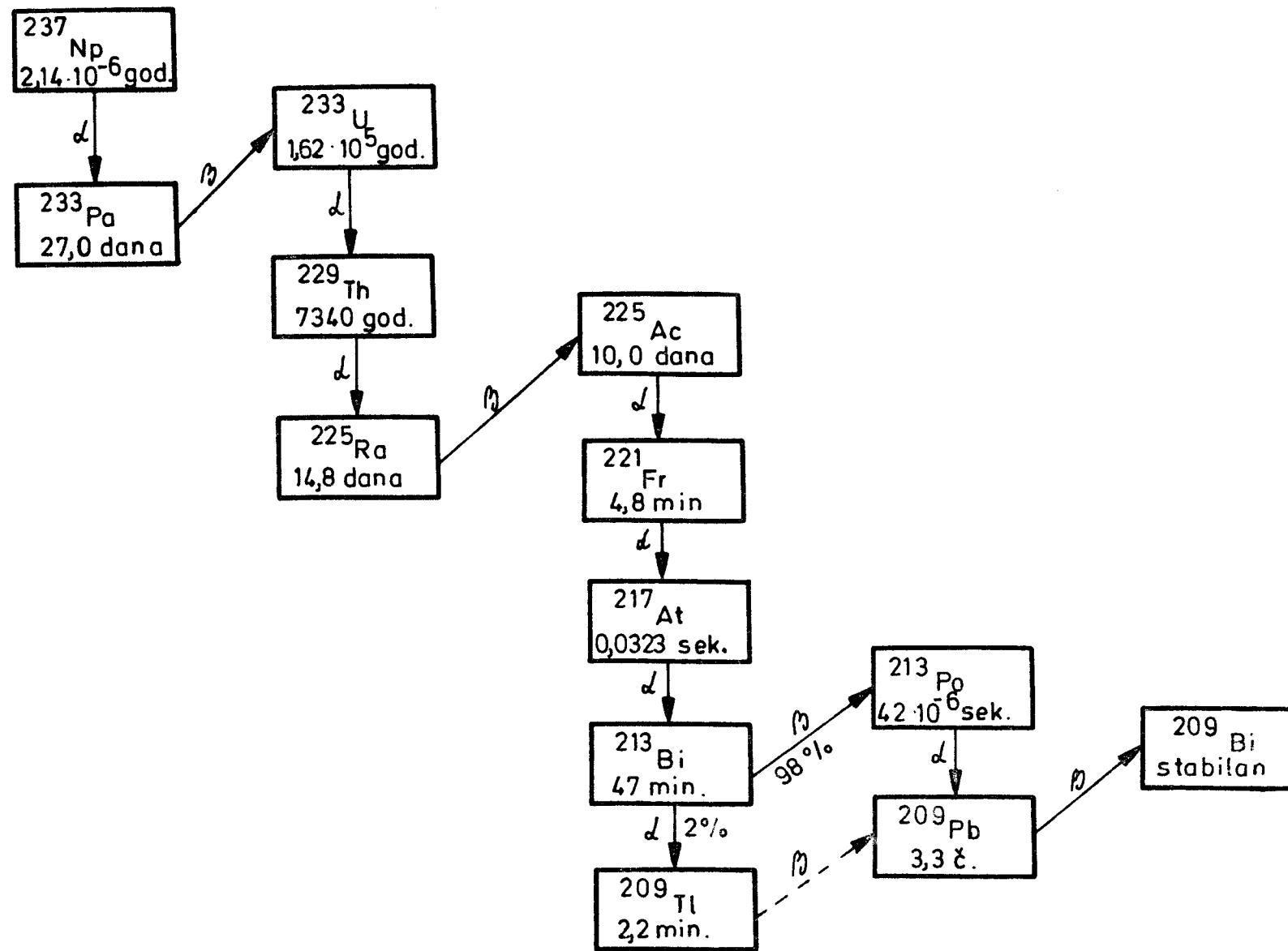
TORIJUMOVA SERIJA



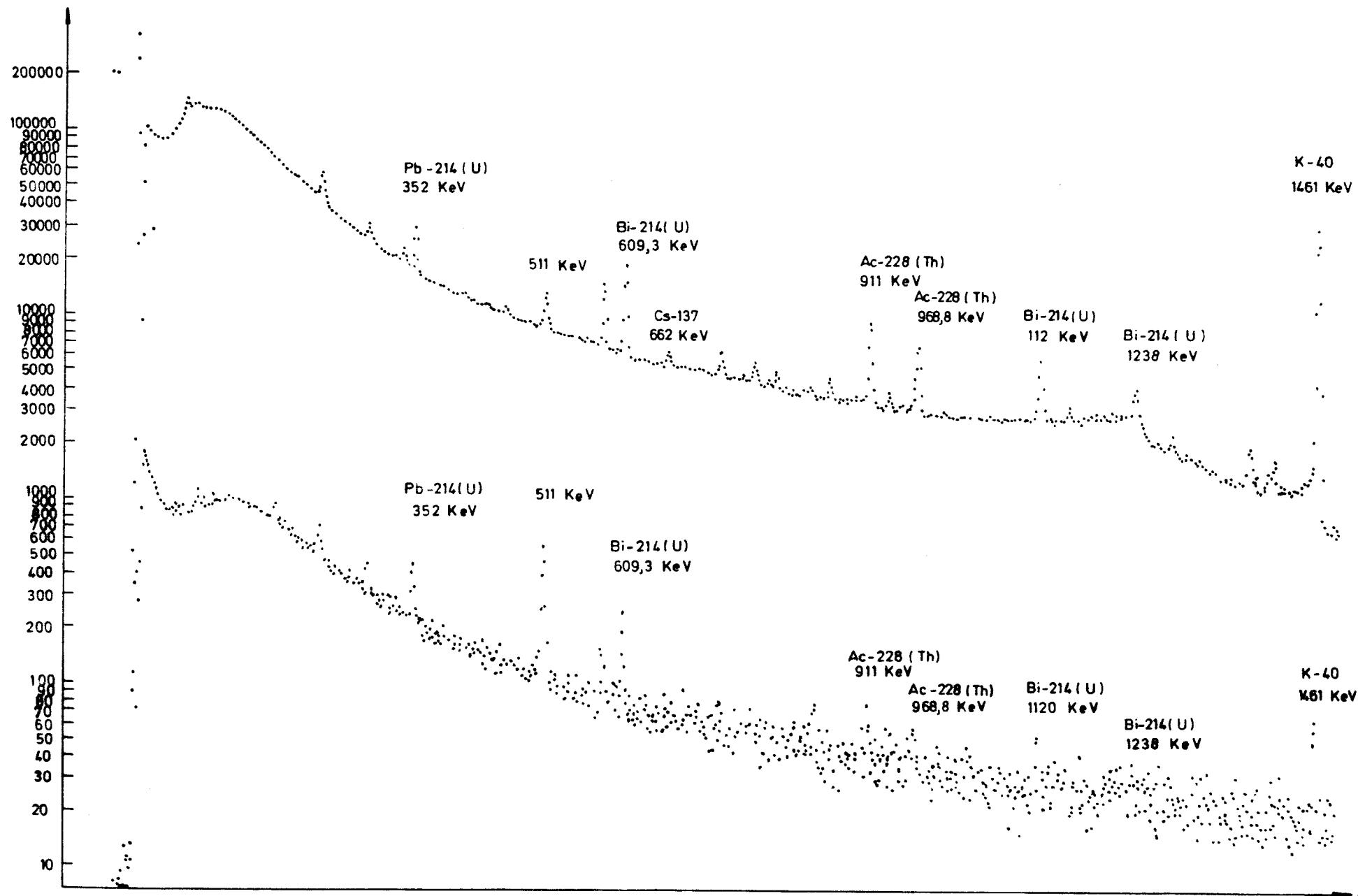
URANIJUMOVA SERIJA



URANAKTINIJUMOVA SERIJA



NEPTUNIEVA SERIJA



22

