



UNIVERZITET U NOVOM SADU

PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

DEPARTMAN ZA FIZIKU



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ  
ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ

Dušan Mrđa

ПРИМЉЕНО:	26 АПР 2004
ОРГАНИЗЈЕД	БРОЈ
0603	280/1

# Komparativna studija pasivnih zaštita za gama spektrometre

-magistarska teza-

Novi Sad, 2004. godina

*Neizmernu zahvalnost na svesrdnoj pomoći u toku izrade ovog rada dugujem dr Ištvanu Bikitu i dr Ivanu Aničinu.*

*Zahvaljujem se dr Miroslavu Veskoviću , dr Jaroslavu Slivki, dr Ljiljani Čonkić i svim zaposlenim na Katedri za nuklearnu fiziku, Departmana za fiziku u Novom Sadu, na korisnim savetima i podršci tokom vremena dok je ovaj rad postepeno dobijao svoju konačnu formu.*

*N.Sad,  
20.04.2004.*

*Mrđa Dušan*

## SADRŽAJ

<i>Uvod.....</i>	1
<i>1. Komponente fona.....</i>	2
<i>1.1 Komponeneta I – gama-zračenje iz okruženja u kojem se nalazi detektorska zaštita.....</i>	3
<i>1.2 Komponenta II- radioaktivnost u konstrukcionim materijalima detektora.....</i>	10
<i>1.3 Komponenta III- radionečistoće u materijalu zaštite.....</i>	13
<i>1.4 Komponenta IV- kosmičko zračenje.....</i>	14
<i>1.5 Komponenta V -radon i njegovi potomci.....</i>	19
<i>2. Karakteristike pasivnih zaštita niskofonskih gama spektrometarskih sistema.....</i>	20
<i>2.1 Fe zaštita u Laboratoriji za nuklearnu fiziku, Departmana za fiziku u Novom Sadu (DFNS).....</i>	20
<i>2.2 Zaštita gama-spektrometarskog sistema niskofonske laboratorije u Podgorici.....</i>	25
<i>2.3 Niskofonska zaštita za poluprovodnički Ge detektor u EG&amp;G ORTEC-ovoj laboratoriji u Oak Ridge-u, Tennessee, USA.....</i>	27
<i>2.4 Zaštita niskofonskog sistema na Max Planck Institutu za nuklearnu fiziku – Heidelberg, Nemačka.....</i>	29
<i>2.5 Niskofonska zaštita spektrometarskog sistema Laboratorije Badan Skazek Radioaktywnych Środowiska - IFJ, Krakow, Polska.....</i>	30
<i>2.6 Uporedni prikaz fonskih spektara niskofonskih gama spektrometarskih sistema.....</i>	31
<i>3. PTB podzemna laboratorija za niskofonsku gama spektrometriju.....</i>	34
<i>4. Karakteristike fonskih spektara laboratorije u Zemunu.....</i>	36
<i>5. Izrada zaštite za detektor HPGe GMX u Laboratoriji za nuklearnu fiziku Departmana za fiziku u Novom Sadu.....</i>	39
<i>5.1 Projekat CRESST.....</i>	39
<i>5.1.1 Eksperimentalna postavka.....</i>	39
<i>5.1.2 CRESST I faza.....</i>	41
<i>5.1.3 Druga faza CRESST-a . Simultana svetlosna i fononska detekcija .....</i>	42
<i>5.1.4 Kolo za »čitanje« izlaza sa superprovodnog termometra.....</i>	46
<i>5.1.5 Planovi i perspektive za CRESST II.....</i>	47
<i>5.2 Materijal za zaštitu HPGe GMX detektora i delovi konstrukcije.....</i>	48
<i>5.3 Fonska svojstva Laboratorije za nuklearnu fiziku DFNS.....</i>	54.
<i>6. Karakteristike fonskih spektara konstruisane Pb zaštite u DFNS.....</i>	56.
<i>7. Aktivni štit za Pb zaštitu u Laboratoriji za nuklearnu fiziku DFNS.....</i>	65.
<i>Zaključak.....</i>	68
<i>Prilog.....</i>	70
<i>Literatura.....</i>	71

U ovom radu se detaljno razmatraju svrštajci koji deju doprinosi spektrometriji radioizotopima i njihovim primenama u detekciji radioaktivnih izotopa.

## Uvod

Niskofonska  $\gamma$ -spektrometrija je deo spektrometrije  $\gamma$  zraka koja se odnosi na detekciju tragova radioizotopa u različitim materijalima odnosno supstancama. Svoju primenu nalazi kod merenja koja se odnose na proučavanje ekstremno retkih nuklearnih procesa kakvi su npr. dvostruki beta raspad ili procesi vezani za problem tamne materije u svemiru. Dakle, niskofonska  $\gamma$  spektrometrija pokriva širok opseg merenja koja se odnose na fundamentalna istraživanja (osnovne interakcije i čestice u prirodi). Za sva ova merenja je uobičajeno da detekcioni prag u energetskom regionu koji nas interesuje treba da bude što je moguće niži.

Razvoj detekcije ionizujućeg zračenja počeo je konstrukcijom ionizacionih komora krajem 19. veka a, nastavio se izradom Gajger-Milerovog brojača (1928.) i proporcionalnog brojača (~1940.). Tokom 1948. u upotrebu ulaze NaI(Tl) scintilacioni kristali koji omogućuju bolje uslove za detekciju gama-zraka. Od tada je scintilaciono brojanje prošireno na više drugih neorganskih (CsI(Tl), CdWO<sub>4</sub>, CaWO<sub>4</sub>,...) i organskih (plastika, tečnosti) supstanci.

Početkom šezdesetih, Ge(Li) i kasnije HP Ge-kristali su revolucionarno doprineli razvoju nuklearne fizike zbog svoje visoke energijske rezolucije.

Kriogenički detektori koji se razvijaju u različitim laboratorijama u svetu, sposobni su da registruju fonone, termalnu "sliku" interakcije čestice sa detektorom, zbog čega treba da postižu još višu energijsku rezoluciju. Njihova primena ograničena je na specijalne oblasti istraživanja.

U današnje vreme u fizici visokih energija nastupio je svojevrstan oblik krize zbog toga što najveći akceleratori na svetu nisu u mogućnosti da ubrzavaju čestice do takvih energija koje bi omogućile prikupljanje novih eksperimentalnih saznanja vezanih za mogućnost objedinjenja osnovnih interakcija u prirodi (elektromagnetne, slabe, jake i gravitacione) u jednu jedinstvenu interakciju. Iz tog razloga je veoma važno proučavanje retkih nuklearnih procesa koji se spontano dešavaju u određenom materijalu, ali i onih procesa koji su indukovani kosmičkim zračenjem. U cilju proučavanja ovakvih procesa potrebna je izrada kvalitetnog gama spektrometerskog sistema. Da bismo pomoću poluprovodničkog Ge detektora mogli registrovati retke i za nas značajne događaje, moramo u najvećoj mogućoj meri redukovati broj onih događaja koji su uzrokovani ometajućim zračenjem iz okruženja detektora[5,21]. To je moguće postići izradom odgovarajuće vrste zaštite od materijala visoke gustine. Ipak izrada takve zaštite nije jednostavan zadatak. Naime, apsorpcija zračenja u materijalu zaštite može se računski odrediti u slučaju kolinisanog snopa zračenja, ali u praksi imamo slučaj postojanja prostorne distribucije spoljašnjih izvora zračenja u okruženju detektora. Intenzitet sekundarnog zračenje koje usled dejstva kosmičkih zraka nastaje u materijalu zaštite nije moguće računski odrediti sa zadovoljavajućom tačnošću. Takođe, materijal od koga se zaštita pravi, u većoj ili manjoj meri sadrži radionuklide prirodnog porekla, ali je moguća i kontaminacija veštačkim radionuklidima. Obzirom na velik efekat samoapsorpcije u ovakvim materijalima, merenje koncentracije aktivnosti radionuklida nije jednostavno što predstavlja dodatni problem već pri samom izboru konkretnog materijala za izradu zaštite za detektor. Zbog svih navedenih razloga, nakon pažljivog izbora materijala, pristupa se izradi



zaštite nakon čega se prikupljanjem odgovarajućih fonskih spektara neposredno proverava njen kvalitet i vrše korekcije u cilju njenog poboljšanja.

U ovom radu se detaljno razmatraju svi činioci koji daju doprinos spektru fona u gama-spektrometriji uključujući nuklearne procese koji se dešavaju u materijalima zaštite, kao i samog detektora.

Budući da se u Laboratoriji za nuklearnu fiziku već nekoliko godina kao detektorska zaštita koristi Fe zaštita, analiziraju se njena svojstva sa stanovišta redukovana zračenja iz okruženja detektora. Razmatra se i problematika prisustva radona u relativno velikoj unutrašnjoj zapremini zaštite.

Uporedjuju se eksperimentalni podaci za različite vrste postojećih zaštita. Pravi se komparacija spektra zaštite koja se koristi na površini Zemlje sa spektrom zaštite smeštenom duboko pod zemljom.

Obzirom, da je za potrebe laboratorije nabavljen poluprovodnički Ge detektor tipa HPGe GMX, koji može da se koristi i za detekciju X zračenja i niskoenergetskih gama zraka, bilo je potrebno izraditi zaštitu specijalno dizajniranu za ovaj tip detektora i odgovarajuću HJ kriostatsku konfiguraciju. Osnovni motiv takvog poduhvata jesu merenja vezana za projekat CRESST [23]. U radu se opisuje kompletan postupak izrade Pb zaštite. Razmatraju se karakteristike zaštite bez unutrašnjih zaštitnih slojeva, kao i mogućnost poboljšanja zaštite postavljanjem odgovarajućeg unutrašnjeg sloja. Ispituje se mogućnost eliminisanja radona iz unutrašnjosti zaštite.

Diskutuje se o mogućnostima dodatne redukcije fona primenom aktivne zaštite.

## 1. Komponente fona

Konstrukcija dobre pasivne zaštite ( ili aktivnog štita) za poluprovodnički HP Ge detektor zahteva detaljno poznavanje porekla i karakteristika fona u «odsustvu» ispitivanog uzorka. Spektru fona Ge detektora koji nije smešten duboko pod zemljom doprinos daju sledeće komponente:

- I Gama zračenje iz okruženja u kojem se nalazi detektorska zaštita [14]
- II Radioaktivnost u konstrukcionim materijalima detektora
- III Radionečistoće u materijalu štita
- IV Kosmičko zračenje:
  - nukleoni
  - mioni
  - aktivacija
- V Radon i njegovi potomci
- VI Neutroni prirodnog porekla ( fisija i (  $\alpha$ , n ) reakcije )

Kritična tačka je stepen radiočistoće detektorske konstrukcije. Njegova dostignuta vrednost je bitna za unapređenje merenja redukcijom ostalih komponenti fona. Niskofonske konfiguracije različitih proizvođača mogu da imaju različit kvalitet. Za postizanje osetljivosti od mBq/kg ili niže pažljiva selekcija materijala za komponente detektora od strane proizvođača je esencijalna.

Osnovna usavršavanja detekcije su moguća u iterativnim koracima izrade sledećeg osetljivijeg spektrometarskog sistema od materijala selektovanih pomoću prethodnog spektrometarskog sistema.

Efekat kosmičkih zraka zavisi od nadmorske visine površinske laboratorije u kojoj je smešten spektrometarski sistem, karakteristika svih plafonskih slojeva iznad zaštite detektora , ali i od dimenzija zaštite i vrste materijala od kojeg je zaštita izrađena.

$^{222}\text{Rn}$  , odnosno njegovi potomci predstavljaju značajan izvor radioaktivnosti distribuirane u vazduhu. Koncentracija aktivnosti  $^{222}\text{Rn}$  može da varira drastično od jedne lokacije do druge , ali postoje promene sa vremenom i na jednoj istoj lokaciji. Obzirom na to da je Rn gas i to inertan , on je na spisku komponenti fona ( I-VI) izdvojen posebno , iako predstavlja sastavni deo komponente I.

Neutroni iz prirodnih fisionih i (  $\alpha$ , n ) reakcija postaju značajni kod ekstremno niskih brzina brojanja.

Iskustvo je pokazalo da za Ge kristal date veličine i uzorak mase od oko 1 kg, potiskivanje komponente I omogućuje merenja koncentracije aktivnosti reda  $\text{Bq/kg}$ ; komponenti II i III oko 10-100  $\text{mBq/kg}$ ; komponente IV - oko  $\text{mBq/kg}$  ; komponente V zajedno sa veoma dobrom selekcijom materijala ( II i III ) - oko 100  $\mu\text{Bq/kg}$ ; komponente VI uz merenje duboko pod zemljom ( $> 100 \text{ m w.e}$ ) oko 10  $\mu\text{Bq/kg}$ . Dugačka vrednost merenja –do nekoliko sedmica preuzimaju se radi postizanja najveće osetljivosti.

### 1.1 Komponeneta I – gama-zračenje iz okruženja u kojem se nalazi detektorska zaštita

Prirodno prisutna radioaktivnost potiče prvenstveno od 3 poznata prirodna radioaktivna niza čiji su rodonačelnici  $^{232}\text{Th}$  ,  $^{238}\text{U}$  i  $^{235}\text{U}$  , kao i od  $^{40}\text{K}$  [4]. Tabele 1,2 i 3 prikazuju članove ovih nizova, kao i odgovarajuće energije emitovanih  $\gamma$  kvanata i verovatnoće njihove emisije po svakom raspadu člana niza . Radioizotopi  $^{232}\text{Th}$  ,  $^{238}\text{U}$  i  $^{235}\text{U}$  imaju ekstremno duge periode poluraspada koji su nekoliko redova veličine duži od perioda poluraspada onih njihovih potomaka sa najdužim periodima poluraspada. To za posledicu ima uspostavljanje sekularne radioaktivne ravnoteže pri kojoj je aktivnost svakog potomka jednaka aktivnosti rodonačelnika niza. Međutim, neki potomak može da nastane kao rezultat dezintegracije pretka koji se raspada i nekim drugim kanalom raspada. Aktivnost nastalog potomka je tada konstantan deo aktivnosti rodonačelnika niza i zavisi od verovatnoće raspada njegovog pretka po kanalu raspada u kojem posmatrani potomak nastaje.

U realnim uslovima se javljaju slučajevi gde dolazi do narušavanja ravnoteže:

- Aktivnost  $^{230}\text{Th}$  ( $T_{1/2}=8.0 \times 10^4 \text{ god}$ ) može da bude drugačija u odnosu na aktivnost  $^{234}\text{U}$  ( $T_{1/2}= 2.47 \times 10^5 \text{ god}$ ) , unutar radioaktivnog niza  $^{238}\text{U}$ , pošto tokom geološkog vrednosti Th i U mogu biti separisani zbog njihove različite rastvorljivosti i dugog perioda poluraspada  $^{230}\text{Th}$ . Ovo automatski znači neravnotežu svih potomaka  $^{230}\text{Th}$  u odnosu na  $^{238}\text{U}$
- Moguća je i hemijska separacija prirodnim putem Ra i U , što dovodi do neravnoteže aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{238}\text{U}$ , čak i ako nije narušena ravnoteža  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$

- Potpuna ravnoteža između  $^{238}\text{U}$  i  $^{222}\text{Rn}$ , odnosno njegovih potomaka ne može se očekivati imajući u vidu da je Rn inertan gas koji u većoj ili manjoj meri emanira iz matrice u kojoj se generiše

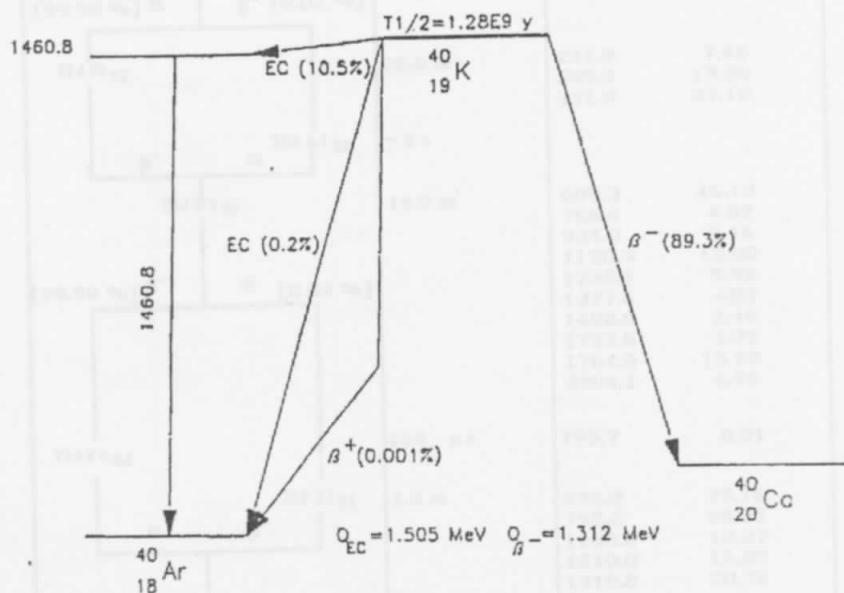
Izotopska obilnost uranijumovih izotopa u prirodi je sledeća:

$^{238}\text{U}$	99.2739 %
$^{235}\text{U}$	0.7204 %
$^{234}\text{U}$	0.0057 %

Uranijuma u Zemljinoj kori ima oko  $2.4 \times 10^{-4} \%$ .

Izotop  $^{232}\text{Th}$  jedini je izotop Th koji se nalazi u prirodi, tj. njegova izotopska obilnost je 100%. U litosferi je zastupljen sa  $7.5 \times 10^{-4} \%$ .

Prirodni kalijum se sastoji od tri izotopa i to dva stabilna i jednog radioaktivnog. Stabilni izotopi su  $^{39}\text{K}$  ( 93.2581 % ) i  $^{41}\text{K}$  ( 6.7302 % ), a radioaktivni  $^{40}\text{K}$  ( 0.0117% ) sa periodom poluraspada  $T_{1/2}=1.28 \times 10^9$  god. Od svih raspada jezgara  $^{40}\text{K}$ , samo u 10.5 % slučajeva emituju se gama-kvanti energije  $E_\gamma=1460.8 \text{ keV}$  ( Sl.1 ). Vrlo često, ova linija je jedna od osnovnih fonskih komponenti. U Zemljinoj kori ima 2.1 % K, što je veoma visoko učešće.



Sl.1. Raspad prirodnog radioizotopa  $^{40}\text{K}$ , koji se raspada putem elektronskog zahvata i  $\beta^+$  raspada do  $^{40}\text{Ar}_{18}$  i putem  $\beta^-$  raspada do  $^{40}\text{Ca}$

Tabela 1. Niz  $^{238}U$

Nuclide	Half-life	Major gamma radiation energies [ keV ] and intensities in %	
$^{238}\text{U}_{92}$	$4.51 \times 10^9$ y		
$\alpha$			
$^{234}\text{Th}_{90}$	24.1 d	63.3	4.49
$\beta^-$		92.6	5.16
$^{234}\text{Pa}_{91}^{m}$	1.17 m	766.6	0.21
$\alpha$		1001.4	0.59
[99.87 %] $\beta^-$	IT [0.13 %]		
$\beta^-$			
$^{234}\text{Pa}_{91}$	6.75 h	131.2	20.0
$\beta^-$		226.8	11.4
$\beta^-$		569.3	13.5
$\beta^-$		882.0	28.0
$\beta^-$		926.4	24.9
$\beta^-$		946.0	12.0
$^{234}\text{U}_{92}$	$2.47 \times 10^5$ y	53.2	0.12
$\alpha$			
$^{230}\text{Th}_{90}$	$8.0 \times 10^4$ y	67.7	0.38
$\alpha$		143.9	0.05
$^{226}\text{Ra}_{88}$	1602 y	186.1	3.5
$\alpha$			
$^{222}\text{Rn}_{86}$	3.823 d		
$\alpha$			
$^{218}\text{Po}_{84}$	3.05 m		
[99.98 %] $\alpha$	$\beta^-$ [0.02 %]		
$\beta^-$			
$^{214}\text{Bi}_{82}$	26.8 m	241.9	7.46
$\beta^-$		295.2	19.20
$\beta^-$		351.9	37.10
$\alpha$			
$^{218}\text{At}_{85}$	$\sim 2$ s		
[99.98 %] $\beta^-$	$\alpha$ [0.02 %]		
$\alpha$			
$^{214}\text{Bi}_{83}$	19.9 m	609.3	46.10
$\alpha$		768.4	4.88
$\alpha$		934.0	3.16
$\alpha$		1120.3	15.00
$\alpha$		1238.1	5.92
$\alpha$		1377.6	4.02
$\alpha$		1408.0	2.48
$\alpha$		1729.6	3.05
$\alpha$		1764.5	15.90
$\alpha$		2204.1	4.99
$^{214}\text{Fe}_{84}$	164 $\mu$ s	799.7	0.01
$\alpha$			
$^{210}\text{Tl}_{81}$	1.3 m	296.0	79.16
$\alpha$		795.0	98.95
$\alpha$		1160.0	12.37
$\alpha$		1210.0	16.82
$\alpha$		1310.0	20.78
$^{210}\text{Pb}_{82}$	22.3 y	46.5	4.05
$\beta^-$			
$^{210}\text{Bi}_{83}$	5.01 d		
[~-100 %] $\beta^-$	$\alpha$ [ 0.00013 %]		
$\alpha$			
$^{210}\text{Fe}_{84}$	138.4 d	803.0	0.0011
$\alpha$			
$^{206}\text{Tl}_{81}$	4.19 m		
$\alpha$			
$^{206}\text{Pb}_{82}$	stable		

Tabela 2. Niż  $^{232}Th$

Nuclide	Half-life	Major gamma radiation energies [ keV] and intensities in %	
$^{232}Th\ 90$	$1.41 \times 10\ 10\ Y$		
$\alpha$			
$^{228}Ra\ 88$	$5.75\ Y$		
$\beta^-$			
$^{228}Ac\ 89$	$6.15\ h$	99.6 [D] 129.1 209.3 270.2 328.0 338.3 409.5 463.0 772.4 [D] 794.9 835.7 964.8 969.0 1588.2 1630.6	1.37 2.45 3.88 3.43 2.95 11.25 1.94 4.44 1.58 4.34 1.68 5.11 <b>16.17</b> 3.27 1.60
$\beta^-$			
$^{228}Th\ 90$	$1.910\ Y$	84.37 216.0	1.6 0.3
$\alpha$			
$^{224}Ra\ 88$	$3.64\ d$	241.0	3.97
$\alpha$			
$^{220}Rn\ 86$	$55\ s$	549.7	0.1
$\alpha$			
$^{216}Po\ 84$	$0.15\ s$		
$\alpha$			
$^{212}Pb\ 82$	$10.64\ h$	238.6 300.1	43.6 3.34
$\beta^-$			
$^{212}Bi\ 83$	$60.6\ m$	39.86 288.1 452.8 727.3 785.4 1620.6	1.10 0.34 0.36 6.65 1.11 1.51
[64.0 %] $\beta^-$			
$\alpha$ [36.0 %]			
$^{212}Po\ 84$	$304\ ns$		
$\alpha$			
$\beta^-$			
$^{208}Tl\ 81$	$3.05\ m$	277.4 510.8 583.2 860.6 2614.5	6.31 22.60 84.50 12.42 99.20
$\alpha$			
$\beta^-$			
$^{208}Pb\ 82$	Stable		

Tabela 3. Niz  $^{235}U$

U sestavuče nizove radioaktivnosti uranu, klasifikované podle významu emisie (S.)

Nuclide	Half-life	Major gamma radiation energies [ keV ] and intensities in %	
$^{235}U\ _{92}$	$7.1 \times 10^8$ Y	143.8 163.3 185.7 205.3	10.9 5.00 57.50 5.00
$\alpha$			
$^{231}Th\ _{90}$	25.5 h	81.5 [D] 84.2	1.29 6.60
$\beta^-$			
$^{231}Pa\ _{91}$	$3.276 \times 10^4$ Y	27.4 283.7 300.0 302.7 330.1	9.3 1.60 2.39 2.24 1.31
$\alpha$			
$^{227}Ac\ _{89}$	21.6 Y		
$\beta^-$			
[98.6 %] $\beta^-$	[1.4 %] $\alpha$		
$^{227}Th\ _{90}$	18.718 d	49.9 50.1 236.0 [D] 256.0 [D]	0.52 7.28 11.65 7.6
$\alpha$			
$^{223}Fr\ _{87}$	22 m	50.8 80.0 234.6	34.0 8.16 3.4
$\alpha$			
$^{223}Ra\ _{88}$	11.43 d	122.3 144.2 154.2 269.4 323.9 338.3 444.9	1.19 3.26 5.59 13.6 3.9 2.78 1.27
$\alpha$			
$^{219}Rn\ _{86}$	4.0 s	271.2 401.7	9.9 6.64
$\alpha$			
$^{215}Po\ _{84}$	1.78 ms		
$\alpha$			
[ - 100% ] $\alpha$	$\beta^-$ [ 0.00023 % ]		
$^{211}Pb\ _{82}$	36.1 m	404.8 427.0 831.8	3.83 1.72 3.8
$\beta^-$			
$^{215}At\ _{85}$	~ 0.1 ms		
$\alpha$			
$^{211}Bi\ _{83}$	2.14 m	351.0	12.76
$\beta^-$			
$\alpha$			
[ 0.28 % ] $\beta^-$	$\alpha$ [ 99.7 % ]		
$^{211}Po\ _{84}$	0.52 s	569.65 897.8	0.53 0.52
$\alpha$			
$^{207}Tl\ _{81}$	4.79 m	897.8	0.24
$\beta^-$			
$^{207}Pb\ _{82}$	Stable		

U zavisnosti od vrste minerala odnosno stene, koncentracije U , Th i K [1] znatno se razlikuju(Tabele 4. i 5.).

*Tabela 4. Tipične koncentracije U, Th i K u pojedinim mineralima i stenama u ppm*

Stena/mineral	U	Th	K
Hlorit	0.014	0.04	860
Bazalt	0.8	2.7	8500
Granit	4.4	16.0	33000
Škriljci	3.8	12.0	28000
Biotit	20.0	25.0	70000
Muskovit	20.0	25.0	70000
K-feldspat	1.5	5.0	90000
Plagioklasi	2.5	1.5	6000
Amfibol	15.0	25.0	3000
Piroksen	20.0	13.0	5000
Cirkon	25000	2000	---

*Tabela 5. Srednje koncentracije U, Th i K u magmatskim i sedimentnim stenama u ppm*

Vrsta stene	U	Th	K
Sijenit	3.0	13.0	48000
Bazaltne stene	1.0	4.0	8300
Ultramafiti	0.001	0.004	40
Glineni škriljci	3.7	12.0	26600
Peščari	0.45	1.7	10700
Karbonati	2.2	1.7	2700
Dubokorske gline	1.3	7.0	25000

Od radionuklida koji ne pripadaju prirodnim serijama  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  i  $^{232}\text{Th}$ , pomenut je jedino  $^{40}\text{K}$ . Međutim, u prirodi se javljaju i drugi radionuklidi koji ne pripadaju serijama[15]. Njihov uticaj na fon niskofonskih gama-spektrometarskih sistema daleko je manji od uticaja članova pomenutih serija , kao i uticaja  $^{40}\text{K}$ , obzirom na njihovu malu zastupljenost u okruženju, ali i činjenicu da se uglavnom ne radi o gama emiterima. Tabela 6. prikazuje ove radionuklide, uključujući tip njihovog raspada i period poluraspada.

Tabela 6. Primordijalni radionuklidi koji ne pripadaju prirodnim nizovima

Radioizotop	Udeo u izotopskom sastavu [ % ]	Period poluraspada [ godine ]	Tip raspada	Energija [ MeV ]	Potomak
<sup>50</sup> V	0.250	$1.4 \times 10^{17}$	EC $\beta^-$	$\gamma$ 1.554;83% $\gamma$ 0.78;17%	<sup>50</sup> Ti <sup>50</sup> Cr
<sup>87</sup> Rb	27.83	$4.9 \times 10^{10}$	$\beta^-$	0.28	<sup>87</sup> Sr
<sup>113</sup> Cd	12.22	$9 \times 10^{15}$	$\beta^-$	0.32	<sup>113</sup> In
<sup>115</sup> In	95.7	$4.4 \times 10^{14}$	$\beta^-$	0.49	<sup>115</sup> Sn
<sup>123</sup> Te	0.0908	$1.3 \times 10^{13}$	EC		<sup>123</sup> Sb
<sup>138</sup> La	0.009	$1.1 \times 10^{11}$	EC $\beta^-$	$\gamma$ 1.44;66% $\gamma$ 0.789;34%	<sup>138</sup> Ba <sup>138</sup> Ce
<sup>144</sup> Nd	23.8	$2.1 \times 10^{15}$	$\alpha$	1.83	<sup>140</sup> Ce
<sup>147</sup> Sm	15.0	$1.1 \times 10^{11}$	$\alpha$	2.23	<sup>143</sup> Nd
<sup>148</sup> Sm	11.3	$7 \times 10^{15}$	$\alpha$	1.96	<sup>144</sup> Nd
<sup>174</sup> Hf	0.162	$2.0 \times 10^{15}$	$\alpha$	2.50	<sup>170</sup> Yb
<sup>176</sup> Lu	2.59	$3.7 \times 10^{10}$	$\beta^-$	$\gamma$ 0.202;86% $\gamma$ 0.307;93%	<sup>176</sup> Hf
<sup>187</sup> Re	62.60	$4.5 \times 10^{10}$	$\beta^-$	0.0026	<sup>187</sup> Os
<sup>186</sup> Os	1.58	$2 \times 10^{15}$	$\alpha$	2.75	<sup>182</sup> W
<sup>190</sup> Pt	0.01	$7 \times 10^{11}$	$\alpha$	3.18	<sup>186</sup> Os

Pod dejstvom neutronske komponente kosmičkih zraka, u višim slojevima atmosfere dolazi do nuklearnih reakcija sa mikrometeoritima i prašinom , pri čemu nastaju kosmogeni radionuklidi [1,17]. Obzirom da dospevaju i u niže slojeve atmosfere, mogu u izvesnoj meri da utiču na fon niskofonskih sistema u gama-spektrometriji. Osnovni kosmogeni radionuklidi predstavljeni su u Tabeli 7.

Tabela 7. Kosmogeni radionuklidi

Radionuklid	Period poluraspada	Brzina nastajanja [atom/ cm <sup>2</sup> x s ]
<sup>3</sup> H	12.26 g	0.25
<sup>7</sup> Be	53 d	0.08
<sup>10</sup> Be	$2.7 \times 10^6$ g	0.05
<sup>14</sup> C	5760 g	2.5
<sup>22</sup> Na	2.6 g	$8.6 \times 10^{-5}$
<sup>25</sup> Al	740 000 g	$1.4 \times 10^{-5}$
<sup>32</sup> Si	280 g	$1.6 \times 10^{-4}$
<sup>32</sup> P	14.3 d	$8.1 \times 10^{-4}$
<sup>33</sup> P	24.4 d	$5.8 \times 10^{-4}$
<sup>35</sup> S	87.9 d	0.0014
<sup>36</sup> Cl	380 000 g	0.0011
<sup>39</sup> Ar	270 g	0.0056
<sup>81</sup> Kr	210 000 g	$10^{-6}$

Antropogeni radionuklidi se uglavnom javljaju kao produkti fisije i aktivacije. Nihov veliki deo potiče od testova nuklearnog oružja u atmosferi, najviše u periodu 1952-1962. Vremenom je aktivnost ovih radioizotopa opala na niski nivo. Međutim, usled Černobilske katastrofe 1986. godine, znčajne količine antropogenih radionuklida rasute su iznad nekih delova evrope. Radionuklidi veštačkog porekla koji najčešće mogu prisutni u okruženju detektorske zaštite su  $^{137}\text{Cs}$  i  $^{134}\text{Cs}$  ( Tabela 8.). Iako je  $^{90}\text{Sr}$  ( $T_{1/2}=28.8$  god.) čisti beta emiter , zakočno zračenje uzrokovano elektronima koje emituje ovaj izotop(  $Q_\beta= 546$  keV ), kao i njegov potomak  $^{90}\text{Y}$  ( $Q_\beta= 2284$  keV ), daje doprinos intenzitetu kontinuma fonskog spektra.

*Tabela 8. Karakteristike veštačkih radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  i  $^{134}\text{Cs}$ .*

Radionuklid	Period poluraspada[godine]	Tip raspada	Energija[MeV]	Potomak
$^{137}\text{Cs}$	30.17	$\beta$	$\gamma$ 0.6617;85.1%	$^{137}\text{Ba}$
$^{134}\text{Cs}$	2.06	$\beta$	$\gamma$ 0.5633;8.38% $\gamma$ 0.5693;15.43% $\gamma$ 0.6047;97.6% $\gamma$ 0.7958;85.4% $\gamma$ 0.8019;8.73%	$^{134}\text{Ba}$

Na fon niskofonskog gama-spektrometarskog sistema uticaće sadržaj prirodnih radionuklida u zemljištu, odnosno stenama koje su prisutne na mestu na kojem je sistem, odnosno zaštita detektora locirana. Kao što se vidi iz Tabele 4. i Tabele 5. , ovaj sadržaj može znatno da varira, te se o izboru pogodnog mesta za izradu detektorske zaštite mora voditi računa i to u maksimalno mogućoj meri koliko to realni uslovi dozvoljavaju. Takođe , planiranje izrade kvalitetnog niskofonskog sistema uključuje i selekciju građevinskog materijala koji se ugrađuje u podlogu, zidove i plafon niskofonske laboratorije .

## 1.2 Komponenta II- radioaktivnost u konstrukcionim materijalima detektora

Najvažniji fundamentalni preduslov za nizak fonski odbroj je pažljiv izbor konstrukcionih detektorskih materijala sa niskom radioaktivnom kontaminacijom. Gama spektroskopija kao nedestruktivan metod primenjuje se u tu svrhu. Alternativna mogućnost je određivanje koncentracije najverovatnijih kontaminanata primenom masene spektrometrije ili neutronske aktivacione analize, iako različiti materijali nisu podjednako pogodni za ove tehnike.

Za većinu materijala osnovni kontaminanti su primordijalni nuklidi K, Th i U. Poslednja dva poseduju kompleksne lance raspada čija radioaktivna ravnoteža može biti narušena [16] tokom proizvodnje materijala . Budući da samo manji broj članova obe serije emituje gama linije relativno visokog prirodnog intenziteta ,stepen u kome je ravnoteža narušena nije uvek moguće odrediti sa zadovoljavajućom tačnošću putem gama spektrometrije. Ipak, vremena za ponovno uspostavljanje ravnoteže među dugoživećim izotopima su tako duga u poređenju sa normalnim eksperimentalnim vremenima merenja, da su informacije prikupljene na osnovu gama-emitera dovoljne za razmatranje uticaja kontaminanata na fon detektora koji treba da se izradi od ispitivanih materijala. Ovo je naglašeno u tom smislu da se npr. koncentracija  $^{226}\text{Ra}$  određena na osnovu gama linija  $^{214}\text{Pb}$  i  $^{214}\text{Bi}$  ( uz uslov da su  $^{222}\text{Rn}$  i  $^{226}\text{Ra}$  u ravnoteži) gotovo neće promeniti tokom veoma dugog perioda iako će

ona težiti onoj koncentraciji koja karakteriše stanje radioaktivne ravnoteže sa  $^{238}\text{U}$ . Najbrža promena dešava se u lancu  $^{232}\text{Th}$ , gde su uključeni  $^{228}\text{Ra}$  ( $T_{1/2} = 5.75$  god.) i  $^{228}\text{Th}$  ( $T_{1/2} = 1.91$  god.).

Specijalna pažnja mora se posvetiti kontaminantima u radioaktivnom nizu koji se podvrgavaju beta raspodu, imajući u vidu zakočno zračenje emitovano kao posledica interakcije elektrona sa materijalom u kome se nalaze beta emiteri.

Efekat samoapsorpcije u ispitivanim materijalima postaje značajan, naročito pri velikoj gustini materijala, odnosno visokom rednom broju elemenata koji ulaze u njihov sastav, pa je ova pojava značajan faktor koji se mora uzeti u obzir kod određivanja koncentracije radionuklida putem gama-spektrometrije.

Naposletku, treba istaći da je moguće bekstvo  $^{222}\text{Rn}$  iz uzorka materijala koji se ispituju ( naročito uzorka koji su u vidu finih granula) te ovo redukuje aktivnost potomaka radona. Ovo može dovesti do potcenjivanja koncentracije  $^{226}\text{Ra}$  u materijalu.

Konverzija koncentracije aktivnosti radionuklida [Bq/kg] u masenu koncentraciju odgovarajućih elemenata [ppb]<sup>\*</sup>, data je u sledećoj listi :

$$\begin{aligned} 1 \text{ Bq/kg } & ^{234}\text{Th}, ^{234m}\text{Pa}, ^{226}\text{Ra}, ^{214}\text{Pb}, ^{214}\text{Pb} \leftrightarrow 81 \times 10^{-9} \text{ gU/g (81 ppb)} \\ & / \text{ sekularna ravnoteža} / \\ 1 \text{ Bq/kg } & ^{228}\text{Ac}, ^{224}\text{Ra}, ^{212}\text{Pb} \leftrightarrow 246 \times 10^{-9} \text{ gTh/g (246 ppb Th)} \\ & / \text{ sekularna ravnoteža} / \\ 1 \text{ Bq/kg } & ^{40}\text{K} \leftrightarrow 32.3 \times 10^{-6} \text{ gK/g (32.3 ppm K)} \end{aligned}$$

Slika 2. prikazuje poprečni presek niskofonskog Ge detektora[12]. Delovi koji mogu biti najviše kontaminirani su kriosorpcioni materijal i delovi prepojačavača. Aktivni ugalj koji se koristi kao kriosorpcioni materijal ima nisku koncentraciju  $^{226}\text{Ra}$  (~ 1 Bq/kg) i  $^{40}\text{K}$  ( 20 Bq/kg ili niže) ukoliko je načinjen od ljske kokosovog oraha. Aktivni ugalj visoke radiočistoće ( ECN, Holandija) sadrži manje od 0.3 Bq/kg  $^{226}\text{Ra}$ . On je, ipak, suviše skup da bi se koristio u proizvodnji Ge detektora.

Uticaj kriosorpcione supstance na fon Ge detektora redukovani je ugradnjom Pb štita koji zaklanja Ge kristal, pri čemu je još pogodnija situacija kod onih kriostatskih konfiguracija kod kojih osa kristala nema pravac ka kriosorpcionom materijalu.

Kao štampana ploča prepojačavača koristi se uglavnom poliester pojačan staklenim vlaknima koji ukupno sadrži do 20 Bq/kg  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{208}\text{Tl}$  i  $^{40}\text{K}$ . Preostale staklene ili komponente koje sadrže keramiku, kao tranzistori, otpornici i kondenzatori su takođe kontaminirani. Isto važi za FET sklop( " Field Effect Transistor ") koji je montiran još bliže Ge kristalu. Sa neznatnim gubitkom u rezoluciji, prepojačavač u zavisnosti od kriostatske konfiguracije, može biti lociran van osi kristala odnosno izvan detektorske zaštite[5].

Pošto se delovi izrađeni od bakra nalaze u neposrednoj blizini kristala, potrebno je da bakar ima visoku radiočistoću. Elektrolitički Cu sadrži manje od 100  $\mu\text{Bq/kg}$   $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{208}\text{Tl}$  i  $^{40}\text{K}$ .

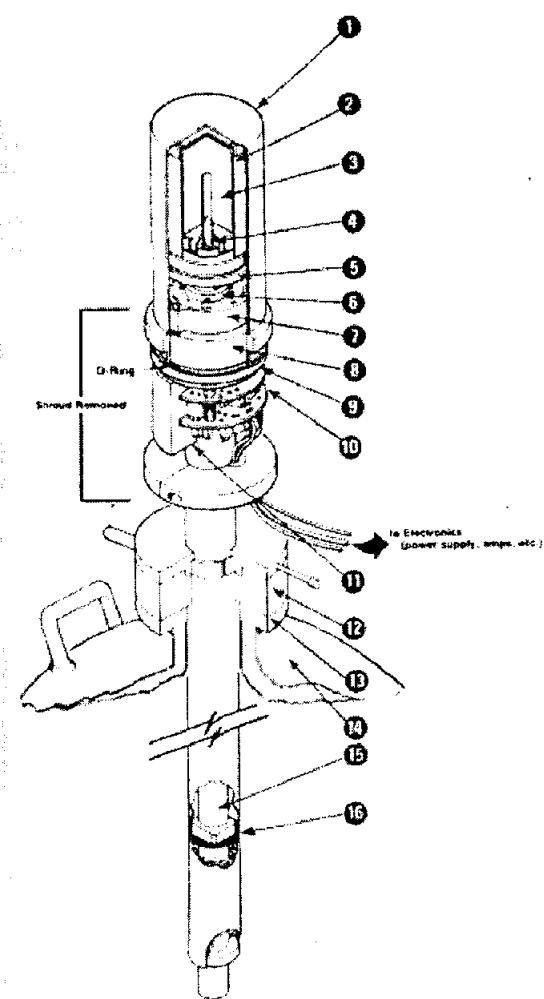
Izolacioni materijali koji su takođe locirani blizu Ge kristala ( teflon npr.) mogu da sadrže do 1 ppm K.

Pažnja se mora posvetiti i spojevima putem kojih se obezbeđuje održavanje visokog napona, odnosno vođenje signala iz detektorskog elementa.

Spoljna kapa detektora proizvodi se od visoko-čistog Mg ( $< 10 \text{ mBq/kg}^{226}\text{Ra}$ ,  $^{208}\text{Tl}$  i  $^{40}\text{K}$ ). Alternativna mogućnost je 99.999% čisti Al sa sadržajem U i Th ispod 1 ppb.

Ulagani prozor kod GMX detektora izrađuje se od berilijuma čistoće 99.8 % , a može da sadrži značajan nivo primordijalnih radionuklida ( nekoliko ppm ). Bolja mogućnost je upotreba ugljeno-vlaknastog kompozita koji je lak, ali čvrst i praktično bez prisustva radioaktivne kontaminacije.

Konačno, svi napor u selekciji materijala su uzaludni, ako je zanemarena moguća površinska kontaminacija . Čišćenje površine pojedinih delova detektora moguće je izvršiti kiselinom ili bazom ( bez sadržaja K ) pre nego što oni budu sastavljeni. Čišćenje i sastavljanje delova mora se obavljati pod specijalnim uslovima u "clean room-u".



Sl.2 Poprečni presek Ge detektora ( "ORTEC", Model CFG-XLB-GEM-SV)

\* parts per billion ( delova na milijardu )

1. Spoljna kapa ( magnezijum galvanizovan niklom), sa berilijumskim prozorom ili prozorom od ugljenih vlakana za GAMMA-X detektor
2. Detektorska montažna kapa ( OFHC bakar-“Oxygen-Free, High-Conductivity)
3. Germanijumski detektorski element
4. Navrtka postolja
5. Postolje ( OFHC bakar )
6. Spona kriogene šipke( OFHC bakar )
7. Termalni izolator ( plastični)
8. Štit (čisto Pb), ~ 2 cm debljine
9. Kriostatska spojka ( nerđajući čelik)
10. Pretpojačavač
11. Visokonaponski filter ( sa Al kućištem)
12. Prsten ( guma )
13. Ivica Dewar-ovog suda
14. Dewar-ov sud
15. Kriogena šipka ( OFHC bakar )
16. Kriosorpcioni materijal ( aktivni ugalj )

### **1.3 Komponenta III- radionečistoće u materijalu zaštite**

Izuvez retkih elemenata kao što su volfram ili tantal, postoji veoma ograničen broj materijala koji su pogodni za redukciju gama zračenja iz okruženja detektora. Takvi materijali treba da imaju visok atomski broj i nisku sopstvenu radioaktivnost [prilog ].

Živa ima visoku radiočistoću koja može biti poboljšana ponovljenim destilacijama. Ipak, radi se o skupom materijalu. Dugoživeći radioizotop  $^{194}\text{Hg}$  ( $T_{1/2}=520$  god. ) može biti produkovani u nezanemarivom iznosu pod uticajem visokoenergetskih neutrona. Obzirom da je Hg tečan metal na sobnoj temperaturi , potrebno je izraditi poseban kontejner određenog oblika u koji bi se ona sipala sa ciljem zaštite detektora od spoljašnjeg gama zračenja.

Gvožđe je relativno jeftino, ali tokom prizvodnje uglavnom kontaminirano kobaltom -60 zbog upotrebe ovog radiouzotopa u kontroli habanja delova visokih peći. Željezo sa starih brodova koje je prizvedeno pre uvođenja ove procedure nema ovaj vid kontaminacije. Sadržaj  $^{226}\text{Ra}$  ,  $^{208}\text{Tl}$  i  $^{40}\text{K}$  u takvom Fe može biti manji od 1 mBq/kg.

Bakar je najmanje problematičan u pogledu kontaminacije primordijalnim radionuklidima. Međutim, kao i gvožđe , Cu ima relativno velik presek za zahvat termalnih neutrona i proizvodnju radioaktivnih jezgara pod dejstvom kosmičkog zračenja. Takođe, interakcija Cu sa mionima dovodi do jačeg uticaja na fon detektora nego što je to slučaj sa materijalima višeg rednog broja Z ( Hg ili Pb ).

Obzirom na svoju prihvatljivu cenu , mehaničke karakteristike, visok atomski broj i relativno mali presek za interakciju sa neutronima, odnosno formiranje radionuklida putem aktivacije , Pb je najšire upotrebljavani materijal kao zaštita za detektore gama zračenja. Nažalost, njegova sopstvena radioaktivnost, u većini slučajeva nije zanemariva. Priroda i poreklo ove kontaminacije razmatrana je od strane većeg broja autora. Rezultati ovih istraživanja ukazuju na činjenicu da je radioizotop  $^{210}\text{Pb}$ , sa svojim potomcima  $^{210}\text{Bi}$  i  $^{210}\text{Po}$  odgovoran za unutrašnju kontaminaciju olova.  $^{210}\text{Pb}$  ima period poluraspada  $T_{1/2}=22.3$  god., a raspada se  $\beta$

raspadom, sa maksimalnom energijom emitovanih elektrona  $E_{max} = 63.5$  keV. Dezintegracijom  $^{210}Pb$  emituju se gama kvanti energije  $E_{\gamma} = 46.5$  keV, sa verovatnoćom emisije  $p_{\gamma} = 4.05\%$ . Zahvaljući niskim energijama elektrona odnosno gama kvanata, unutar samog olova izražen je efekat samoapsorpcije za pomenuto zračenje. Međutim,  $^{210}Bi$  emituje elektrone energije  $E_{max} = 1163$  keV, što dovodi do generisanja zakočnog zračenja u olovu, kao i pojave karakterističnog X-zračenja olova. Maksimum zakočnog zračenja je na oko 170 keV, dok su energije karakterističnih X-zraka Pb 72.8, 75.0, 84.9 i 87.4 keV.  $^{210}Po$  je alfa emiter čija je energija alfa čestica 5.30 MeV. On emituje gama zrake energije  $E_{\gamma} = 803$  keV, slabog intenziteta ( $p_{\gamma} = 0.0011\%$ ). Koncentracije  $^{210}Pb$  u olovu navedene u literaturi kreću se u rasponu od detekcione granice odgovarajućeg detektora, do 2500 Bq/kg. Prosečna vrednost je oko 300 Bq/kg.  $^{210}Pb$  se javlja kao posledica određenog prisustva minerala uranijuma u kombinaciji sa rudama olova. Zbog velikih razlika u hemijskim osobinama u odnosu na Pb, radioizotopi  $^{238}U$  i  $^{226}Ra$  se efikasno separišu u procesu rafinacije. Međutim izotop  $^{210}Pb$  neizbežno prati olovo, dajući isti odnos  $^{210}Pb/Pb$  u ingotima kao u rudi. Takođe, ugalj koji se koristi prilikom proizvodnje olova, doprinosi njegovoj kontaminaciji izotopom  $^{210}Pb$ , pošto ugalj obično sadrži uranijum u značajnim količinama. Redukcioni procesi bez upotrebe uglja sprečavaju ovaj vid kontaminacije. U današnje vreme je komercijalno dostupno oovo sa koncentracijom aktivnosti  $^{210}Pb$  manjom od 50 Bq/kg ("Boliden", Švedska ili "Doe Run", USA), po ceni 2-3 puta većoj u odnosu na običino oovo. Kompanija "Plumbum" iz Poljske proizvodi oovo sa 5 Bq/kg  $^{210}Pb$ . Druga kompanija ( Johnson and Matthey ) proizvodi oovo ( LC2 ) sa oko 0.4 Bq/kg zahvaljujući optimizaciji svakog koraka u procesu proizvodnje[5]. Ovo oovo se uglavnom proizvodi za elektronsku industriju i suviše je skupo da bi se upotrijevalo u velikim količinama. Alternativa je staro oovo ( nekoliko perioda polurasпадa  $^{210}Pb$  ). Međutim, dostupnost takvog olova je veoma ograničena, budući da se potencijalni "izvori" kao što su cevi za vodu stare više od 200 godina, ili potonuli stari brodovi retko nalaze. Izuzimajući  $^{210}Pb$  i njegove potomke, prisustvo kontaminanata U i Th u olovu nije utvrđeno. Sa najvećom osetljivošću odredene gornje granice za  $^{226}Ra$  i  $^{208}Tl$  su 0.25 mBq/kg i 0.29 mBq/kg respektivno, odnosno 0.33 mBq/kg i 0.67 mBq/kg.  $^{40}K$  meren putem neutronske aktivacione analize je sadržan u LC2 olovu( Johnson and Matthey ) u koncentraciji od oko 0.14 mBq/kg.

U cilju redukovanja intenziteta karakterističnog X-zračenja Pb, kao unutrašnji sloj zaštite moguća je upotreba materijala kao što su Cu, Cd i Sn.

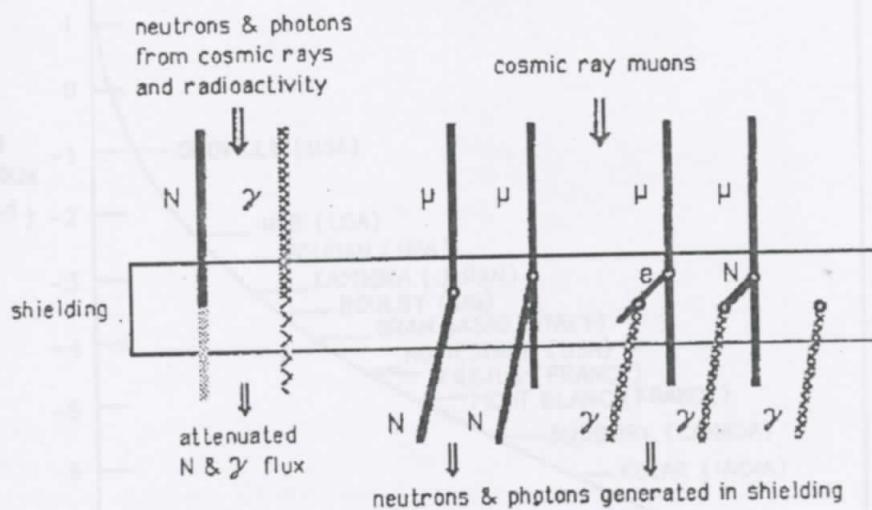
#### 1.4 Komponenta IV- kosmičko zračenje

Najznačajniji uticaj kosmičkog zračenja na fon poluprovodničkih detektora potiče od miona i neutrona [3]. Elektroni i fotonii ( meka komponenta )se u velikoj meri apsorbiju u materijalu šita. Protonska komponenta je zanemarivog intenziteta u poređenju sa neutronskom, pri čemu protoni prilikom interakcije sa materijalom šita prvenstveno dovode do generisanja neutrona.

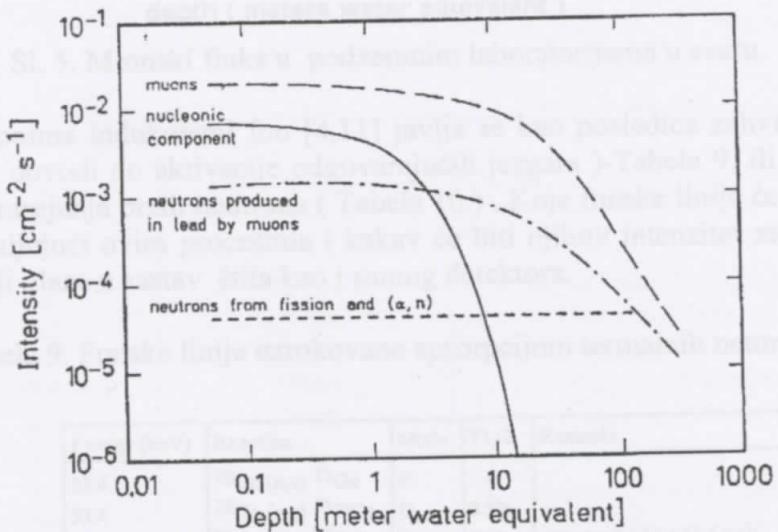
Radi poređenja, fluksevi protona, elektrona, neutrona i miona na nivou mora odnose se respektivno kao 1:26:37:111 pri čemu je protonski fluks  $1.71 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Usled interakcije kosmičkog zračenja sa materijalima šita dolazi do izmena u relativnom odnosu flukseva, obzirom da se novi elektronsko-fotonski pljuskovi, kao i neutroni proizvode pod uticajem miona ( Sl.3 ). Dakle, kontinualno međudejstvo apsorpcije i kreiranja čestica dovodi do promena relativnog odnosa među fluksevima. Dodatni uticaj na intenzitet kosmičkog zračenja javlja se usled promene nadmorske visine,

geografske širine, ugla u odnosu na pravac ka zenitu ili u zavisnosti od faze Sunčevog ciklusa [10].

Na slici 4. su predstavljeni fluksevi komponenti kosmičkog zračenja kao funkcije debljine pokrovnog sloja iznad detektorskog štita uključujući neutrone proizvedene Pb štitom pod uticajem miona ( $\mu$ -zahvat i fotonuklearne reakcije brzih miona), kao i neutrone čije je poreklo prirodna fisija i ( $\alpha, n$ ) reakcije.

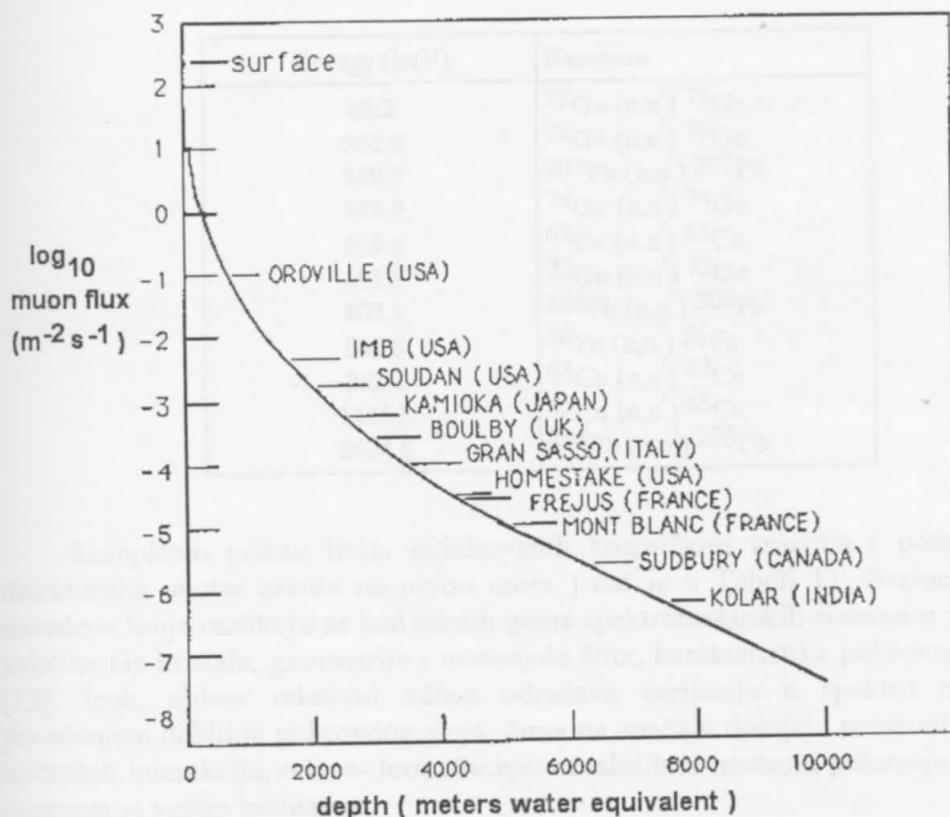


S1.3 Interakcija miona sa materijalom štita



S1.4. Fluks kosmičkog zračenja u zavisnosti od dubine na kojoj je locirana zaštita detektor-a

Vrednost fluksa miona u pojedinim laboratorijama koje su smeštene ispod površine Zemlje kao funkcija dubine na kojoj se nalaze predstavljena je na slici 5.



S1. 5. Mionski fluks u podzemnim laboratorijama u svetu

Neutronima indukovani fon [4,11] javlja se kao posledica zahvata termalnih neutrona( što dovodi do aktivacije odgovarajućih jezgara )-Tabela 9, ili neutronskog neelastičnog rasejanja brzih neutrona ( Tabela 10.) . Koje fonske linije će se pojaviti u spektru zahvaljujući ovim procesima i kakav će biti njihov intenzitet zavisi od vrste materijala koji ulaze u sastav štita kao i samog detektora.

Tabela 9. Fonske linije uzrokovane apsorpcijom termalnih neutrona

Energy (keV)	Reaction	Mode	T <sub>1/2</sub>	Remarks
23.4	$^{70}\text{Ge} (\text{n},\gamma) ^{71}\text{Ge}$	P	-	
53.4	$^{72}\text{Ge} (\text{n},\gamma) ^{73}\text{mGe}$	D	0.50s	
66.7	$^{72}\text{Ge} (\text{n},\gamma) ^{73}\text{mGe}$	D	0.50s	sum peak 13.3 + 53.4 keV
139.7	$^{74}\text{Ge} (\text{n},\gamma) ^{74}\text{mGe}$	D	47.7s	
159.5	$^{76}\text{Ge} (\text{n},\gamma) ^{77}\text{mGe}$	D	52.9s	
174.9	$^{70}\text{Ge} (\text{n},\gamma) ^{71}\text{mGe}$	D	0.022s	
198.9	$^{70}\text{Ge} (\text{n},\gamma) ^{71}\text{mGe}$	D	0.022s	sum peak 23.4 + 174.9 keV
203.1	$\text{Cu} (\text{n},\gamma) \text{Cu}$	P		
278.3	$^{63}\text{Cu} (\text{n},\gamma) ^{64}\text{Cu}$	P		
558.3	$^{113}\text{Cd} (\text{n},\gamma) ^{114}\text{Cd}$	P		
651.0	$^{113}\text{Cd} (\text{n},\gamma) ^{114}\text{Cd}$	P		
805.7	$^{113}\text{Cd} (\text{n},\gamma) ^{114}\text{Cd}$	P		

P: promptna emisija  $\gamma$  zraka ; D:  $\gamma$  zrak kao posledica raspada aktiviranog jezgra

Tabela 10. Linije u spektru fona generisane neelastičnim rasejanjem brzih neutrona

Table 10. Fonske linije

Energy (keV)	Reaction
68.2	$^{73}\text{Ge}(\text{n},\text{n}')^{73}\text{Ge}$
562.9	$^{76}\text{Ge}(\text{n},\text{n}')^{76}\text{Ge}$
569.7	$^{207}\text{Pb}(\text{n},\text{n}')^{207}\text{Pb}$
595.9	$^{74}\text{Ge}(\text{n},\text{n}')^{74}\text{Ge}$
669.6	$^{63}\text{Cu}(\text{n},\text{n}')^{63}\text{Cu}$
691.3	$^{72}\text{Ge}(\text{n},\text{n}')^{72}\text{Ge}$
803.1	$^{206}\text{Pb}(\text{n},\text{n}')^{206}\text{Pb}$
846.8	$^{56}\text{Fe}(\text{n},\text{n}')^{56}\text{Fe}$
962.1	$^{63}\text{Cu}(\text{n},\text{n}')^{63}\text{Cu}$
1115.5	$^{65}\text{Cu}(\text{n},\text{n}')^{65}\text{Cu}$
2624.6	$^{208}\text{Pb}(\text{n},\text{n}')^{208}\text{Pb}$

Kompletan prikaz linija indukovanih kosmičkim zracima ( posmatranih Ge detektorima unutar zaštite na nivou mora ) dat je u Tabeli 11. Brzine brojanja za navedene linije razlikuju se kod raznih gama spektrometarskih sistema u zavisnosti od veličine Ge kristala, geometrije i materijala štita, karakteristika pokrovnog sloja, itd. [13]. Ipak, njihov relativni odnos odražava varijacije u spektru neutrona. Sa povećanjem debljine pokrovnog sloja, čime na značaju dobijaju neutroni poreklom iz mionskih interakcija, odnos- termalni:epitermalni:brz neutroni pokazuju porast udela neutrona sa većim brzinama.

Tabela 11. Fonske linije Ge detektora proizvedene kosmičkim zracima

Energy [keV]	Isotope (source)	Reaction
10.37	$^{68.71}\text{Ge}$	$^{70}\text{Ge}(\text{n},\gamma)^{71}\text{Ge}$ , $^{70}\text{Ge}(\text{n},3\text{n})^{68}\text{Ge}$
13.3	$^{73m}\text{Ge}$	$^{72}\text{Ge}(\text{n},\gamma)^{74}\text{Ge}(\text{n},2\text{n})$
23.5	$^{71m}\text{Ge}$	$^{70}\text{Ge}(\text{n},\gamma)^{72}\text{Ge}(\text{n},2\text{n})$
53.4	$^{73m}\text{Ge}$	$^{72}\text{Ge}(\text{n},\gamma)^{74}\text{Ge}(\text{n},2\text{n})$
66.7	$^{73m}\text{Ge}$	$^{72}\text{Ge}(\text{n},\gamma)^{74}\text{Ge}(\text{n},2)$
68.7	$^{73^*}\text{Ge}$	$^{73}\text{Ge}(\text{n},\text{n}')$
72.8		excitation by muon-induced
75.0	Pb X-rays	electrons in lead (also by $^{210}\text{Pb}$ )
84.9		via its daughter $^{210}\text{Bi}$ )
87.4		$^{19}\text{F}(\text{n},\text{n}')$
109.9	$^{19}\text{F}$	$^{19}\text{F}(\text{n},\text{n}')$
122.1	$^{57}\text{Fe}$ , $^{57}\text{Co}$	$^{57}\text{Fe}(\text{n},\text{n}')$ , activation of Cu/Ni

Najintenzivnije linije su one od  $^{73}\text{Ge}$  i  $^{74}\text{Ge}$  na 139.3 i 195.3 keV. One mogu dobiti intensitet do oko 270 reakcija za den, za 1 kg Ge detektora ( $100 \text{ cm}^{-2}$ ).

Ge linije navedene u Tabeli 10, su prekrenute jednostavno kada mogu na delu koji odgovara visokoj energiji. Međutim, uspon vrha na oviči energiji karakterističan je dohvatanjem jekra, modulacijom, zbog komaka jekra Ge podložen eksponovanju neutronu do pojave polikrorna krupe ka višoj energiji. U ovom slučaju se

Tabela 11. ( nastavak )

Energy [keV]	Isotope (source)	Reaction
136.5	$^{57}\text{Co}$	activation of Cu/Ni
139.5	$^{75m}\text{Ge}$	$^{74}\text{Ge}(\text{n},\gamma), ^{76}\text{Ge}(\text{n},2\text{n})$
143.6	$^{57}\text{Co}$	activation of Ge
159.5	$^{77m}\text{Ge}$	$^{76}\text{Ge}(\text{n},\gamma)$
174.9	$^{71m}\text{Ge}$	$^{70}\text{Ge}(\text{n},\gamma), ^{72}\text{Ge}(\text{n},2\text{n})$
186.0	$^{66}\text{Cu}$	$^{65}\text{Cu}(\text{n},\gamma)$
198.3	$^{71m}\text{Ge}$	$^{70}\text{Ge}(\text{n},\gamma), ^{72}\text{Ge}(\text{n},2\text{n})$
278.3	$^{64}\text{Cu}$	$^{63}\text{Cu}(\text{n},\gamma), ^{65}\text{Cu}(\text{n},2\text{n})$
368	$^{200}\text{Hg}$	$^{199}\text{Hg}(\text{n},\gamma)$
511	$\beta^+$	muon-induced pair production
558.4	$^{114}\text{Cd}$	$^{113}\text{Cd}(\text{n},\gamma)$
562.8	$^{76}\text{Ge}$	$^{76}\text{Ge}(\text{n},\text{n}')$
579.2	$^{207}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}(\text{n},\text{n}')$
595.8	$^{74}\text{Ge}$	$^{74}\text{Ge}(\text{n},\text{n}')$
651.1	$^{114}\text{Cd}$	$^{113}\text{Cd}(\text{n},\gamma)$
669.6	$^{63}\text{Cu}$	$^{63}\text{Cu}(\text{n},\text{n}')$
691.0	$^{72}\text{Ge}$	$^{72}\text{Ge}(\text{n},\text{n}')$
803.3	$^{206}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}(\text{n},\text{n}')$
805.9	$^{114}\text{Cd}$	$^{113}\text{Cd}(\text{n},\gamma)$
810.8	$^{58}\text{Co}$	activation of Cu/Ni
817.9	$^{58}\text{Co}$	activation of Ge
834.0	$^{72}\text{Ge}$	$^{72}\text{Ge}(\text{n},\text{n}')$
834.8	$^{54}\text{Mn}$	activation of Fe/Co/Ni
840.8	$^{54}\text{Mn}$	activation of Ge
846.8	$^{56}\text{Fe}$	$^{56}\text{Fe}(\text{n},\text{n}')$
962.1	$^{63}\text{Cu}$	$^{63}\text{Cu}(\text{n},\text{n}')$
1063.6	$^{207}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}(\text{n},\text{n}')$
1097.3	$^{116}\text{In}$	$^{115}\text{In}(\text{n},\gamma)$
1115.5	$^{65}\text{Cu}$	$^{65}\text{Cu}(\text{n},\text{n}')$
1125.2	$^{65}\text{Zn}$	activation of Ge
1173.2	$^{60}\text{Co}$	activation of Cu/Ni
1293.5	$^{116}\text{In}$	$^{115}\text{In}(\text{n},\gamma)$
1327.0	$^{63}\text{Cu}$	$^{63}\text{Cu}(\text{n},\text{n}')$
1332.5	$^{60}\text{Co}$	activation of Cu/Ni
1412.1	$^{63}\text{Cu}$	$^{63}\text{Cu}(\text{n},\text{n}')$
1481.7	$^{65}\text{Cu}$	$^{65}\text{Cu}(\text{n},\text{n}')$
1547	$^{63}\text{Cu}$	$^{63}\text{Cu}(\text{n},\text{n}')$
2223	$^2\text{H}$	$^1\text{H}(\text{n},\gamma)$

Najintenzivnije linije su one od  $^{75m}\text{Ge}$  i  $^{71m}\text{Ge}$  na 139.7 i 198.3 keV. One mogu dostići intenzitet do oko 200 odbroja za dan, za 1 kg Ge detektor ( $190 \text{ cm}^3$ ).

Ge linije navedene u Tabeli 10. su proširene, odnosno imaju blaži nagib na delu koji odgovara višoj energiji. Naime, uspon vrha na nižoj energiji okarakterisan je deekscitacijom jezgra, međutim, zbog uzimaka jezgra Ge prilikom rasejanja neutrona dolazi do pojave proširenja linije ka višoj energiji. U ovom slučaju se i

energija uzmaka jezgra deponuje u krisatalu Ge pre nego sto nalektrisanje koje je nastalo kao posledica deekscitacije bude prikupljeno električnim poljem. Pikovi izomernih stanja Ge nisu prošireni , budući da se deekscituju sa dovoljno vremena kašnjenja u odnosu na deponovanje energije uzmaka jezgra[5].

Mioni se usporavaju skoro isključivo putem elektromagnetne interakcije sa materijom kroz koju se kreću. Ovo rezultuje u proizvodnji elektronsko-fotonskih pljuskova duž mionske putanje. Elektroni, u svom kretanju, proizvode nove fotone zakočnim zračenjem. Bremstrahlung je proces koji je kod miona znatno redukovani u odnosu na elektrone , budući da je njihova masa mirovanja 207 puta veća od mase elektrona. Obzirom na to, energetski gubici dešavaju se u vidu vrlo malih frakcija primarne energije miona, što u kombinaciji sa relativističkim produženjem vremena života , omogućuje mionima da prodiru duboko u Zemljinu koru. Nakon usporenja , oni se ili raspadaju ( elektron + neutrino), ili mogu biti zahvaćeni od strane jezgra. U prvom slučaju sledi elektronsko-fotonski pljusak, a u drugom redni broj jezgra mete je redukovani za jedinicu , emituje se jedan ili nekoliko neutrona, a nekoliko MeV preostaje za ekscitaciju. Uloga neutrina nije bitna sa stanovišta uticaja na fon Ge detektora. Od elektron-fotonskih pljuskova, indukovanih u materijalu štita, uglavnom fotoni pogađaju detektor zbog njihovog većeg dometa.

### 1.5. Komponenta V -radon i njegovi potomci

Radioaktivni element Rn, koji ima izotope u nizu Th i oba niza U, zaslužuje posebnu pažnju pošto je gas ( spada u grupu plemenitih gasova ). Izotopi Rn navedeni su u Tabeli 12.

Tabela 12. Izotopi radona

Niz	Izotop	Period poluraspada
$^{232}\text{Th}$	$^{220}\text{Rn}$	54.5 s
$^{235}\text{U}$	$^{219}\text{Rn}$	3.92 s
$^{238}\text{U}$	$^{222}\text{Rn}$	3.82 d

Rn se vazdušnim ili vodenim putem može preneti daleko od mesta formiranja. To se prevashodno odnosi na  $^{222}\text{Rn}$  zbog njegovog relativno dugog perioda poluraspada. Zbog toga je njegov uticaj na fon Ge detektora najizrazitiji i to putem produkata njegovog raspada  $^{214}\text{Pb}$  i  $^{214}\text{Bi}$  koji predstavljaju izrazite  $\gamma$  emitere.

Koncentracija Rn u prostoriji u kojoj je smešten gama-spektrometarski sistem zavisi od više faktora:

1. vrste građevinskog materijala
2. sastava tla na kojem leži građevina
3. koncentracije Rn u vodovodnoj vodi
4. meteoroloških uslova
5. ventilacije prostorije

Ukoliko se ne preduzmu posebne mere, Rn iz vazduha dospeva u unutrašnjost zaštite niskofonskih sistema, gde će mu koncentracija biti slična onoj u laboratorijskoj prostoriji. Prosečna koncentracacija Rn koju možemo očekivati u laboratoriji je 50-100 Bq/m<sup>3</sup>.U prostorijama sa slabom ventilacijom nisu retke vrednosti od nekoliko

stotina  $Bq/m^3$ . Oblaganje unutrašnjosti prostorije Al limom, uz odgovarajuću ventilaciju, može dovesti do znatnog smanjenja koncentracije Rn[2].

Doprinos Rn fonu detektora je proporcionalan koncentraciji Rn u vazduhu , kao i zapremini vazdušnog prostora koji opkoljava detektor.

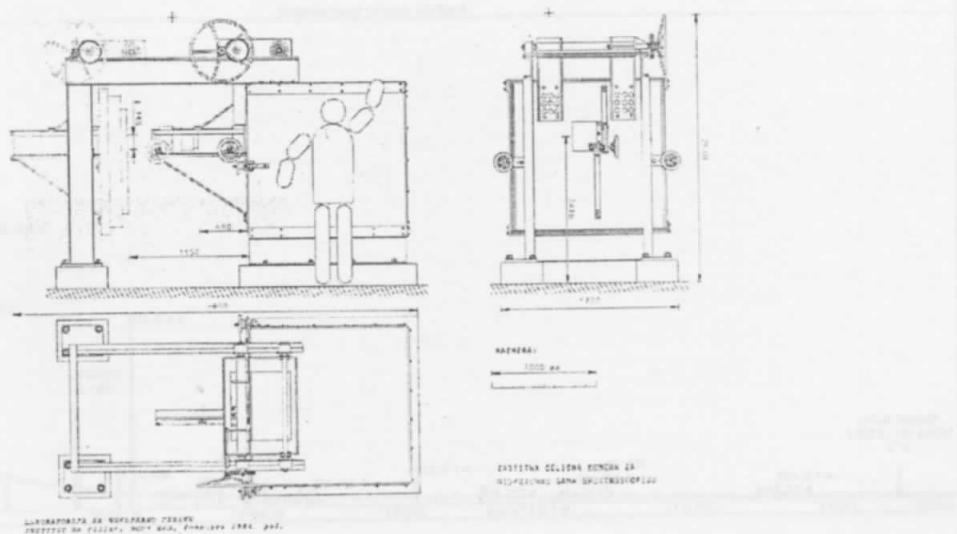
## 2. Karakteristike pasivnih zaštita niskofonskih gama-spektrometarskih sistema

U ovoj glavi će biti prikazana svojstva nekoliko postojećih zaštita za gama-spektrometarske sisteme . Pored opisa materijala koji su korišćeni za njihovu izradu, analiziraju se odgovarajući fonski spektri i međusobno upoređuju dostignuti nivoi fonskog odbroja, kako ukupni, tako i za pojedine energijske intervale.

### 2.1. Fe zaštita u Laboratoriji za nuklearnu fiziku, Departmana za fiziku u Novom Sadu (DFNS )

Fe zaštita je izrađena od Fe livenog pre II svetskog rata koje ne sadrži dugoživeće fisione produkte poreklom iz vazdušnih nuklearnih eksplozija kao ni izotop  $^{60}Co$ . Zidovi zaštitne komore su sastavljeni od limova debljine oko 1 cm izrađenih od pomenutog Fe. Limene ploče su isečene iz oplate starog švedskog broda " Orient II ". Komora ima oblik kocke sa pomičnim vratima. Debljina zidova komore iznosi 25 cm, a korisna zapremina  $1 m^3$ , pa se u nju može smestiti detektor sa Djuarovim sudom. Raspoloživi prostor je dovoljan i za postavku NaI(Tl) detektora u kombinaciji sa Ge detektorom, radi realizovanja antikoincidentnog sistema i potiskivanja komptonski rasejanih fotona[20]. Na vratima se nalaze mala kružna vrata (  $d=15$  cm) za postavljanje uzorka koji se analiziraju. Radi smanjenja uticaja zračenja podlage , cela komora je uzdignuta iznad betonske osnove na visinu od 0.5 m pomoću nosača izrađenih od starih železničkih šina. Na zidovima komore postoje samo otvori(  $d=20$  mm) za dolivanje tečnog azota u Djuarov sud , za vođenje električnih kablova do detektora (  $d=15$  mm ) i dva otvora za prinudnu ventilaciju (  $d=15$  mm ) [2].

Konstrukcija gvozdene zaštitne komore u DFNS data je na slici 6.



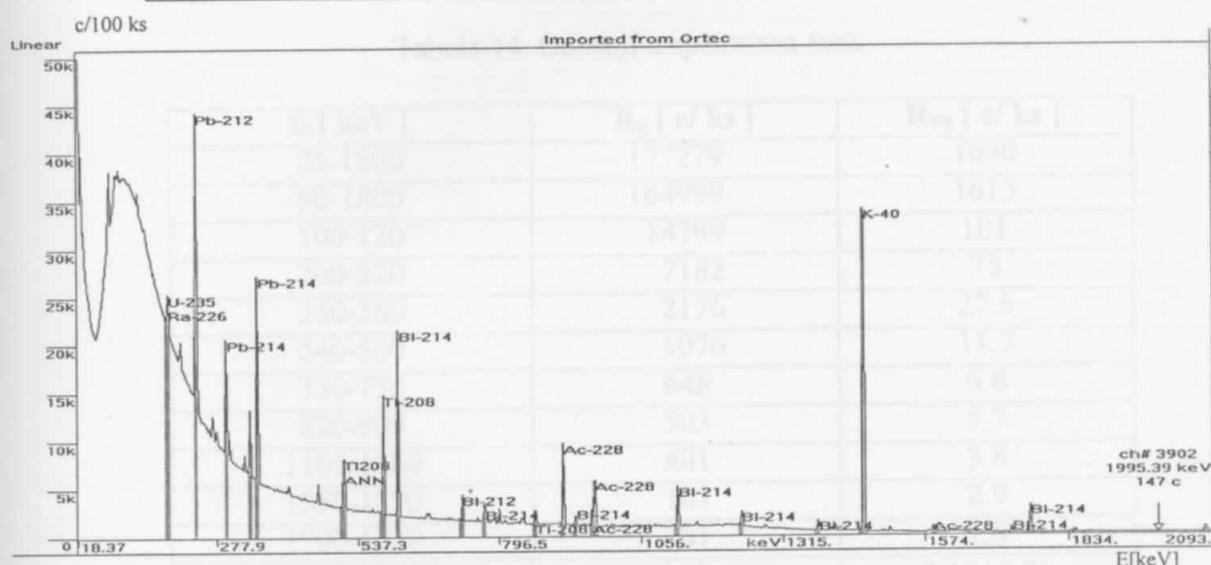
Sl.6.Konstrukcija gvozdene zaštite u DFNS

Sposobnost redukovanja fona u gama-spektrometriji primenom opisane Fe zaštite ispitana je pomoću poluprovodničkog GMX HPGe detektora, proizvođača " ORTEC ", SAD, tipa LLB-GMX-HJ, relativne efikasnosti 32.4 %. Gama spektri su snimljeni pomoću GMX HPGe detektora koji se nalazio u laboratoriji van zaštite (spektar na Sl. 7.), kao i unutar Fe zaštite ( spektar na Sl.8) . Oba prikazana spektra su normirana na živo vreme od 100 ks kako bi na slikama mogli međusobno da se upoređuju, budući da su spektri snimani tokom vremenskih intervala različite dužine.

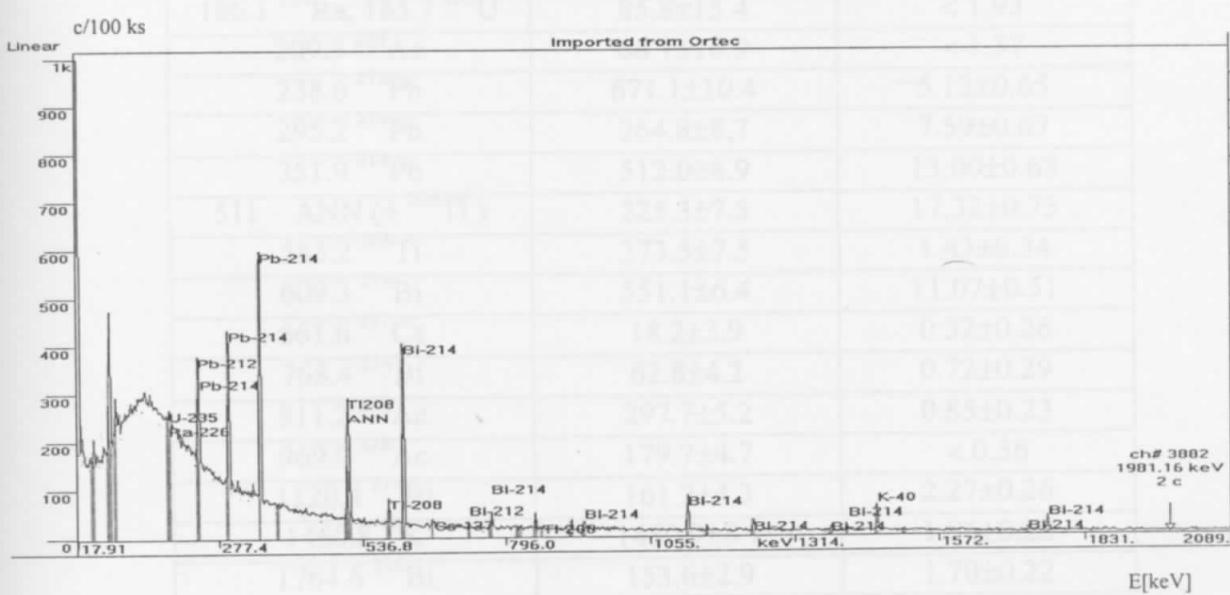
Vremena snimanja spektara ( realno i živo vreme) , data su u Tabeli 13.

Tabela 13. Vremena snimanja spektara

vreme	Detektor bez zaštite	Detektor sa Fe zaštitom
realno [ s ]	65 912	175 500
živo [ s ]	65 601	175 414



#### S1.7. Spektar GMX HPGe detektora bez zaštite



#### S1.8. Spektar GMX HPGe detektora unutar Fe zaštite

Analiza spektara izvršena je pomoću programskog paketa «APTEC», pri čemu je za identifikaciju spektralnih linija korištena «Tabela izotopa», 8. izdanje ( 1996. John Wiley & Sons, Inc.)

U spektru snimljenom bez detektorske zaštite dominiraju karakteristične linije koje potiču od članova niza  $^{238}\text{U}$  i niza  $^{232}\text{Th}$ . Takođe, izrazita je linija od 511 keV, kao i linija  $^{40}\text{K}$  od 1460.8 keV. Treba istaći da određeni doprinos intenzitetu linije od 511 keV daju i gama kvanti koji potiču od  $^{208}\text{Tl}$  ( $E_{\gamma}=510.8 \text{ keV}$ ), iako je ona dominantno anihilacionog karaktera[9,18], pa će i u narednom tekstu biti korišten naziv "anihilaciona linija". Jedini radionuklid antropogenog porekla čije je prisustvo vidljivo u okruženju detektora jeste  $^{137}\text{Cs}$ , a potiče iz akcidenta u Černobilu.

Odbroji po jedinici vremena za pojedine energijske intervale, kao i za fonske gama linije, dati su u Tabeli br.14., gde se  $R_0$  odnosi na odbroj detektora bez zaštite, a  $R_{\text{Fe}}$  na odbroj detektora unutar Fe zaštite.

Tabela 14. Odbroji u spektrima fona

$E$ [ keV ]	$R_0$ [ c/ ks ]	$R_{\text{Fe}}$ [ c/ ks ]
25-1800	177279	1690
50-1800	164999	1615
100-120	14799	101
200-220	7182	78
360-380	2176	27.5
540-560	1076	11.7
730-750	648	6.8
880-900	503	5.7
1160-1180	401	3.8
1350-1370	187	2.9
1700-1720	61	1.8
74.97 Pb-K $\alpha_1$ (+Bi K $\alpha_2$ )	$114.8 \pm 15.9$ *	$3.15 \pm 0.71$
129.1 $^{228}\text{Ac}$	$62.3 \pm 20.6$	< 2.3
186.1 $^{226}\text{Ra}$ , 185.7 $^{235}\text{U}$	$85.8 \pm 15.4$	< 1.93
209.3 $^{228}\text{Ac}$	$66.7 \pm 10.9$	< 1.37
238.6 $^{212}\text{Pb}$	$671.1 \pm 10.4$	$-5.12 \pm 0.65$
295.2 $^{214}\text{Pb}$	$264.8 \pm 8.7$	$7.59 \pm 0.67$
351.9 $^{214}\text{Pb}$	$512.0 \pm 8.9$	$13.00 \pm 0.63$
511 ANN (+ $^{208}\text{Tl}$ )	$225.3 \pm 7.5$	$17.32 \pm 0.73$
583.2 $^{208}\text{Tl}$	$373.5 \pm 7.5$	$1.43 \pm 0.34$
609.3 $^{214}\text{Bi}$	$551.1 \pm 6.4$	$11.07 \pm 0.51$
661.6 $^{137}\text{Cs}$	$18.2 \pm 3.9$	$0.32 \pm 0.26$
768.4 $^{214}\text{Bi}$	$62.8 \pm 4.2$	$0.72 \pm 0.29$
911.2 $^{228}\text{Ac}$	$297.7 \pm 5.2$	$0.85 \pm 0.23$
969.0 $^{228}\text{Ac}$	$179.7 \pm 4.7$	< 0.56
1120.4 $^{214}\text{Bi}$	$161.2 \pm 4.3$	$2.27 \pm 0.26$
1460.8 $^{40}\text{K}$	$1480.9 \pm 8.1$	$1.86 \pm 0.22$
1764.6 $^{214}\text{Bi}$	$153.6 \pm 2.9$	$1.70 \pm 0.22$

\*

$\sigma = 1.645$  za sve linije

U prethodnoj tabeli se vidi da intenzitet linije od 511 keV iznosi  $225.3 \pm 7.5$  c/ks kada ne postoji zaštita oko detektora. Koliki ideo intenziteta ove linije potiče od  $^{208}\text{Tl}$ , moguće je proceniti na osnovu intenziteta linije  $^{208}\text{Tl}$  od 583.2 keV, koji iznosi  $373.5 \pm 7.5$  c/ks, smatrajući da je efikasnost detekcije približno ista za obe energije. Dobijamo da je 100 c/ks doprinos liniji od 511 keV koji potiče od  $^{208}\text{Tl}$ , tj. da se usled anihilacije generiše oko 125 c/ks. Kada je detektor smešten unutar zaštite, ukupan intenzitet na 511 keV iznosi  $17.32 \pm 0.73$  c/ks, dok je doprinos  $^{208}\text{Tl}$  zanemariv - samo oko 0.4 c/ks.

Tabela 15. prikazuje relativne preostale intenzitete kontinuuma i preostale neto intenzitete spektralnih linija, izražene u procentima, koji su dobijeni deobom  $R_{\text{Fe}}$  i  $R_0$ .

Tabela 15. Relativni preostali intenziteti

E [keV]	$R_{\text{Fe}}/R_0 [\%]$
25-1800	0.95
50-1800	0.98
100-120	0.68
200-220	1.09
360-380	1.26
540-560	1.09
730-750	1.05
880-900	1.13
1160-1180	0.95
1350-1370	1.55
1700-1720	2.95
74.97 $\text{Pb-K}\alpha_1 (+\text{Bi K}\alpha_2)$	$2.74 \pm 0.73$
129.1 $^{228}\text{Ac}$	< 3.69
186.1 $^{226}\text{Ra}$ , 185.7 $^{235}\text{U}$	< 2.25
209.3 $^{228}\text{Ac}$	< 2.05
238.6 $^{212}\text{Pb}$	$0.76 \pm 0.098$
295.2 $^{214}\text{Pb}$	$2.87 \pm 0.27$
351.9 $^{214}\text{Pb}$	$2.54 \pm 0.13$
511 ANN (+ $^{208}\text{Tl}$ )	$7.69 \pm 0.41$
511 ANN	~ 13.5
583.2 $^{208}\text{Tl}$	$0.38 \pm 0.091$
609.3 $^{214}\text{Bi}$	$2.01 \pm 0.095$
661.6 $^{137}\text{Cs}$	$1.76 \pm 1.48$
768.4 $^{214}\text{Bi}$	$1.15 \pm 0.47$
911.2 $^{228}\text{Ac}$	$0.29 \pm 0.08$
969.0 $^{228}\text{Ac}$	< 0.31
1120.4 $^{214}\text{Bi}$	$1.41 \pm 0.17$
1460.8 $^{40}\text{K}$	$0.13 \pm 0.015$
1764.6 $^{214}\text{Bi}$	$1.11 \pm 0.15$

Kao sto se vidi iz Tabela 14. i 15. , postavljanjem detektora u Fe zaštitu obezbedena je znatna redukcija ukupnog odbroja (oko 100 puta), kao i neto odbroja spektralnih linija. Spektri dobijeni primenom Fe zaštite sadrže postradonske linije obzirom na prisustvo Rn u relativno velikoj zapremini u kojoj je smešten detektor[19,22]. Integralni odbroj na energijskom intervalu 25keV-1800 keV iznosio je 1.7 c/s.

U cilju provere varijacija intenziteta postradonskih spektralnih linija, analizirano je 7 spektara fona GMX HPGe detektora unutar Fe zaštite snimljenih u periodu januar 2000.-avgust 2001. godine. Rezultati su prikazani u Tabeli 16.

Tabela 16. Intenziteti postradonskih linija u spektrima fona

R.br.	Datum snimanja	R [ c/ks ] ( E <sub>γ</sub> = 295 keV)	R [ c/ks ] ( E <sub>γ</sub> = 351 keV)	R [ c/ks ] ( E <sub>γ</sub> = 609 keV)	vreme snimanja [s]
1	14.01.2000.	5.77±0.57	9.73±0.58	7.10±0.39	242377
2	19.02.2000.	<b>3.38±0.73</b>	<b>6.64±0.66</b>	<b>5.15±0.45</b>	158696
3	03.03.2000.	5.04±0.76	8.06±0.67	5.79±0.43	185894
4	30.07.2000.	4.26±0.87	7.95±0.81	6.28±0.60	99482
5	30.09.2000.	3.81±0.68	5.74±0.66	4.88±0.44	167876
6	16.03.2001.	6.06±0.67	12.17±0.67	9.53±0.45	227816
7	15.06.2001.	3.97±0.66	8.75±0.74	6.71±0.51	153634
8	25.08.2001.	<b>7.59±0.67</b>	<b>13.00±0.63</b>	<b>11.07±0.51</b>	<b>175414</b>

Kao sto je vidljivo iz navedene tabele, linije maksimalnog intenziteta su prisutne u spektru br. 8, a minimalnog intenziteta u spektru br.2.

U Tabeli br. 17. dat je odnos maksimalnog i minimalnog intenziteta postradonskih linija, pri čemu je sa R<sub>8</sub> označen intenzitet linije u spektru br. 8, a sa R<sub>2</sub> intenzitet linije u spektru br. 2.

Tabela 17. Odnos maksimalnog i minimalnog intenziteta postradonskih linija

R <sub>8</sub> /R <sub>2</sub> ( E <sub>γ</sub> = 295 keV)	R <sub>8</sub> /R <sub>2</sub> ( E <sub>γ</sub> = 351 keV)	R <sub>8</sub> /R <sub>2</sub> ( E <sub>γ</sub> = 609 keV)
2.25±0.52	1.96±0.22	2.15±0.21

Da bi se utvrdio uticaj varijacija intenziteta postradonskih linija na određivanje aktivnosti nekog uzorka, računato je kolika aktivnost <sup>214</sup>Pb korespondira brzini brojanja od 3.4 c/ks (spektar br. 2 za E<sub>γ</sub>= 295 keV) , odnosno 7.6 c/ks (spektar br. 8 za E<sub>γ</sub>= 295 keV). Uzimajući da je p<sub>γ</sub>=0.192 i ε = 15.6 x 10<sup>-3</sup> (efikasnost za cilindričnu geometriju d=67 mm, h=62 mm), sledi da je A<sub>2</sub>= 1.14 Bq i A<sub>8</sub>=2.5 Bq, gde se indeks 2 odnosi na spektar br.2, a indeks 8 na spektar br.8. Vidimo da je varijacija aktivnosti A<sub>8</sub> – A<sub>2</sub> ≈ 1.35 Bq. Za uzorak čija je koncentracija aktivnosti 90 Bq/kg i masa u pomenutoj geometriji m = 333 g , sistematska greška izmerene aktivnosti za

ovaj uzorak uzrokovana varijacijama intenziteta postradonskih linija iznosi  $1.35/30 = 0.045$ , što u procentima iznosi 4.5 %.

Pri rasejanju brzih neutrona na gvožđu zaštitne komore :  $\text{Fe}^{56}$  ( n, n' )  $\text{Fe}^{56}$ , emituju se gama kvanti energije 846.8 keV. Intenziteti ove linije u fonskim spektrima ( r.br.1-r.br.8) dati su u tabeli 18.

Tabela 18. Intenzitet linije od 846.8 keV koja nastaje rasejanjem neutrona na jezgrima  $\text{Fe}^{56}$

R.br.	Datum snimanja	vreme snimanja [s]	R [ c/ks ] ( $E_{\gamma} = 846.8 \text{ keV}$ )
1	14.01.2000.	242377	$1.24 \pm 0.24$
2	19.02.2000.	158696	$1.23 \pm 0.33$
3	03.03.2000.	185894	$1.08 \pm 0.26$
4	30.07.2000.	99482	$1.26 \pm 0.36$
5	30.09.2000.	167876	$1.50 \pm 0.29$
6	16.03.2001.	227816	$1.36 \pm 0.27$
7	15.06.2001.	153634	$1.07 \pm 0.29$
8	25.08.2001.	175414	$1.23 \pm 0.26$

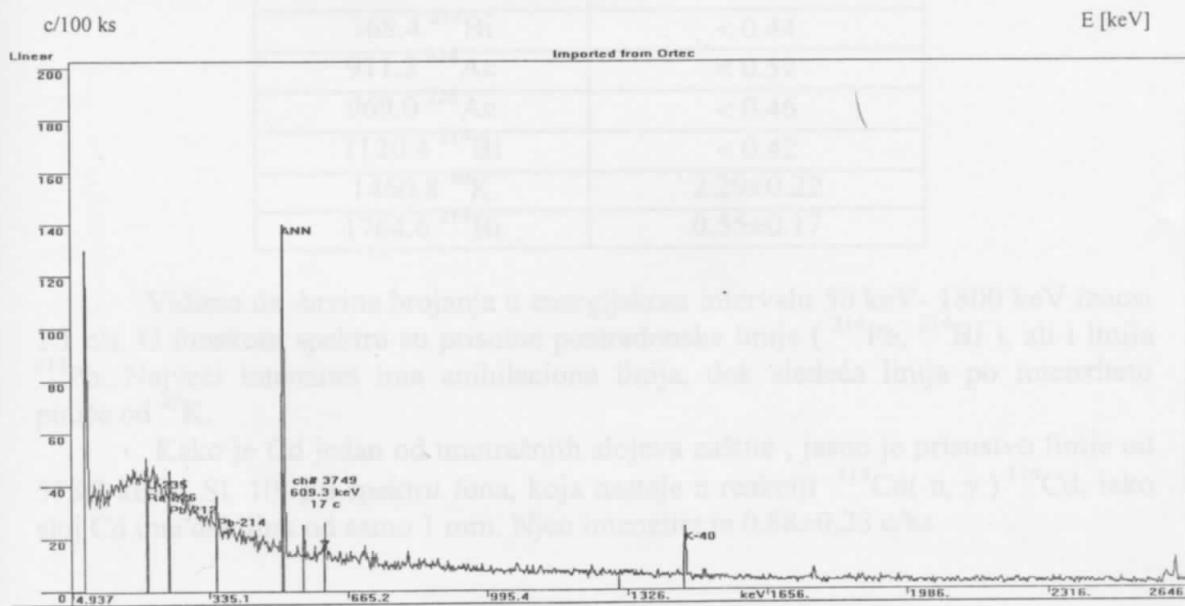
Vidimo da varijacije intenziteta posmatrane linije ne prelaze okvir statističke greške.

## 2.2. Zaštita gama-spektrometarskog sistema niskofonske laboratorije u Podgorici

Snimanje fonskog spektra izvršeno je HPGe koaksijalnim detektorom relativne efikasnosti 40 %, model XLB-GEM-SV proizvođača "ORTEC", SAD.

Zaštita detektora ( Von Gahlen, model VG-BB-98/19A-2) se sastoji od 100 mm Pb i unutrašnjim slojevima Cu : 2 mm, Cd : 1 mm, perspeks : 4 mm.

Vreme snimanja spektra iznosi  $t = 213580.6 \text{ s}$ , a ukupan broj kanala u spektru 16384. Spektar je prikazan na slici 9.



Slika 9. Spektar fona HPGe detektora unutar Pb + ( Cu+Cd+perspeks ) zaštite

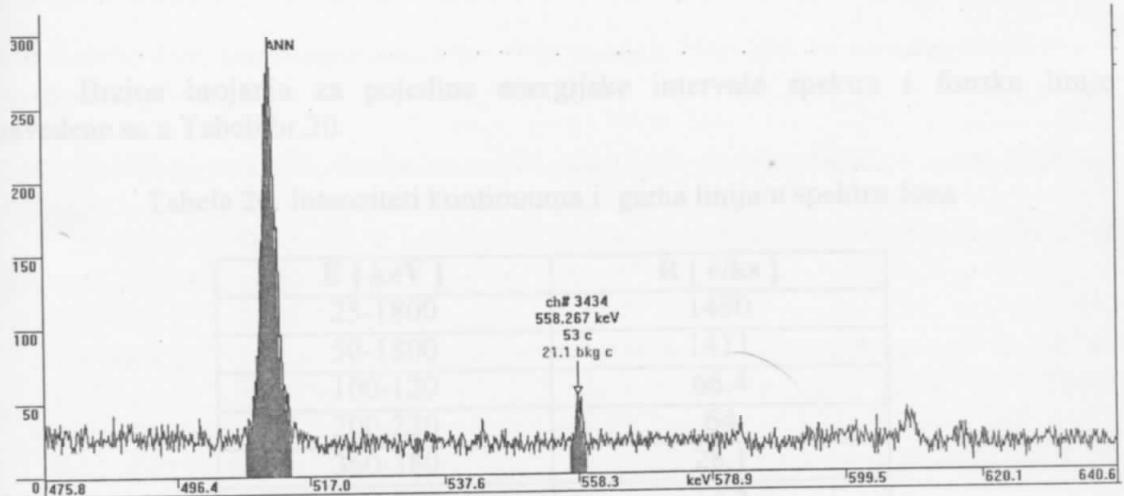
Odbroji po jedinici vremena za pojedine energijske intervale spektra, kao i za fonske gama linije, navedeni su u Tabeli br. 19.

Tabela 19. Intenziteti kontinuuma i gama linija u spektru fona

E [ keV ]	R [ c/ks ]
40-1800	1116
50-1800	1097
100-120	40
200-220	41.2
360-380	21.9
540-560	13.1
730-750	8.47
880-900	6.91
1160-1180	5.07
1350-1370	3.68
1700-1720	2.48
74.97 Pb-K $\alpha_1$	< 0.81
129.1 $^{228}\text{Ac}$	< 0.94
186.1 $^{226}\text{Ra}$ , 185.7 $^{235}\text{U}$	< 1.19
209.3 $^{228}\text{Ac}$	< 0.86
238.6 $^{212}\text{Pb}$	1.37±0.54
295.2 $^{214}\text{Pb}$	1.03±0.41
351.9 $^{214}\text{Pb}$	1.19±0.34
511 ANN	18.33±0.64
583.2 $^{208}\text{Tl}$	< 0.78
609.3 $^{214}\text{Bi}$	1.10±0.29
661.6 $^{137}\text{Cs}$	< 0.48
768.4 $^{214}\text{Bi}$	< 0.44
911.2 $^{228}\text{Ac}$	< 0.52
969.0 $^{228}\text{Ac}$	< 0.46
1120.4 $^{214}\text{Bi}$	< 0.42
1460.8 $^{40}\text{K}$	2.29±0.22
1764.6 $^{214}\text{Bi}$	0.55±0.17

Vidimo da brzina brojanja u energijskom intervalu 50 keV- 1800 keV iznosi 1.1 c/s. U fonskom spektru su prisutne postradonske linije ( $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ), ali i linija  $^{212}\text{Pb}$ . Najveći intenzitet ima anihilaciona linija, dok sledeća linija po intenzitetu potiče od  $^{40}\text{K}$ .

Kako je Cd jedan od unutrašnjih slojeva zaštite, jasno je prisustvo linije od 558.2 keV ( Sl. 10. ) u spektru fona, koja nastaje u reakciji  $^{113}\text{Cd}( \text{n}, \gamma )^{114}\text{Cd}$ , iako sloj Cd ima debljinu od samo 1 mm. Njen intenzitet je  $0.88\pm0.23$  c/ks.



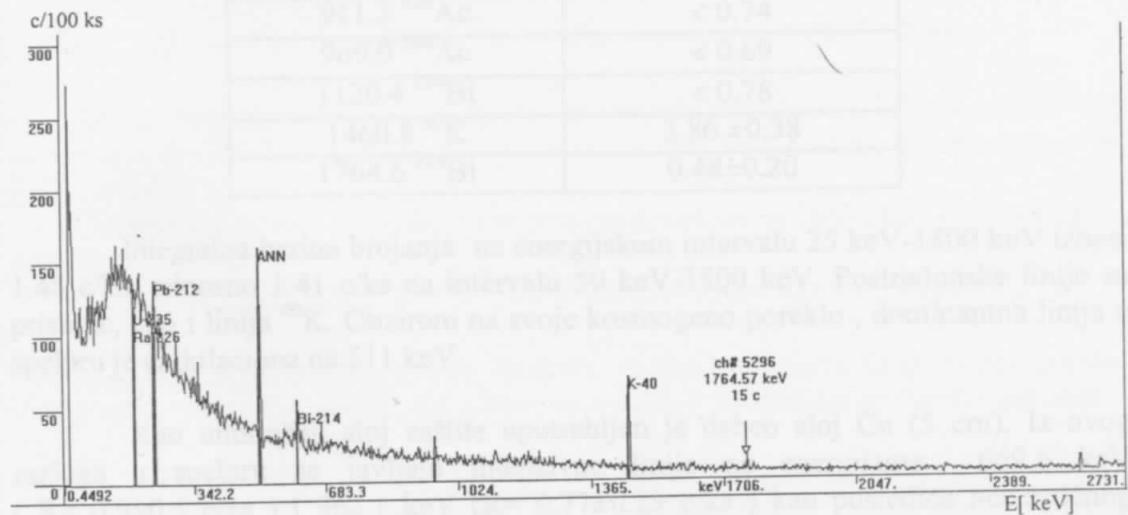
S1. 10. Gama linija od 558.2 keV iz reakcije  $^{113}\text{Cd}(n, \gamma)^{114}\text{Cd}$ . Levo je anihaliciona linija.

Vrednosti na vertikalnoj osi odnose se na registrovani odbroj tokom vremena snimanja spektra, tj. ne radi se o brzini brojanja.

### 2.3. Niskofonska zaštita za poluprovodnički Ge detektor u EG&G ORTEC-ovoj laboratoriji u Oak Ridge-u, Tennessee, USA.

Laboratorija za niskofonska merenja kompanije EG&G ORTEC u Oak Ridge-u nalazi se na nadmorskoj visini od 300 m. Detektor GMX HPGe, tipa LLB-GMX-HJ, relativne efikasnosti 32.4 %, koji se sada nalazi u DFNS, testiran je u pomenutoj laboratoriji. U ovom poglavlju biće analiziran fonski spektar ovog detektora snimljen u laboratoriji ORTEC-a.

Zaštita detektora sastoji se od 15 cm nisko-aktivnog Pb, sa unutrašnjim slojem visoko čistog Cu debljine 5 cm. Vreme snimanja spektra iznosi  $t = 100$  ks, a broj kanala u spektru 8196. Spektar je prikazan na S1.11.



S1.11. Fonski spektar GMX HPGe detektora unutar Pb+Cu zaštite

Brzine brojanja za pojedine energijske intervale spektra i fonske linije navedene su u Tabeli br.20.

Tabela 20. Intenziteti kontinuuma i gama linija u spektru fona

E [ keV ]	R [ c/ks ]
25-1800	1480
50-1800	1411
100-120	66.4
200-220	64
360-380	28.1
540-560	13.5
730-750	9.75
880-900	7.44
1160-1180	4.95
1350-1370	3.39
1700-1720	1.70
74.97 Pb-K $\alpha_1$	< 1.52
129.1 $^{228}\text{Ac}$	< 2.09
186.1 $^{226}\text{Ra}$ , 185.7 $^{235}\text{U}$	< 2.43
209.3 $^{228}\text{Ac}$	< 1.70
238.6 $^{212}\text{Pb}$	1.28 $\pm$ 0.74
295.2 $^{214}\text{Pb}$	1.76 $\pm$ 0.74
351.9 $^{214}\text{Pb}$	1.14 $\pm$ 0.69
511 ANN	9.61 $\pm$ 0.81
583.2 $^{208}\text{Tl}$	< 0.91
609.3 $^{214}\text{Bi}$	1.01 $\pm$ 0.43
661.6 $^{137}\text{Cs}$	< 0.75
768.4 $^{214}\text{Bi}$	< 0.89
911.2 $^{228}\text{Ac}$	< 0.74
969.0 $^{228}\text{Ac}$	< 0.69
1120.4 $^{214}\text{Bi}$	< 0.78
1460.8 $^{40}\text{K}$	3.86 $\pm$ 0.38
1764.6 $^{214}\text{Bi}$	0.48 $\pm$ 0.20

Integralna brzina brojanja na energijskom intervalu 25 keV-1800 keV iznosi 1.48 c/ks, odnosno 1.41 c/ks na intervalu 50 keV-1800 keV. Postradonske linije su prisutne, kao i linija  $^{40}\text{K}$ . Obzirom na svoje kosmogeno poreklo, dominantna linija u spektru je anihilaciona na 511 keV.

Kao unutrašnji sloj zaštite upotrebljen je deboj sloj Cu (5 cm). Iz ovog razloga u spektru se javljaju intenzivne linije na energijama 669.6 keV (R= 0.9  $\pm$  0.5 c/ks) i 962.1 keV (R= 0.77  $\pm$  0.29 c/ks) kao posledica neelastičnog rasejanja neutrona na jezgrima bakra:  $^{63}\text{Cu}$  (n, n')  $^{63}\text{Cu}$ .

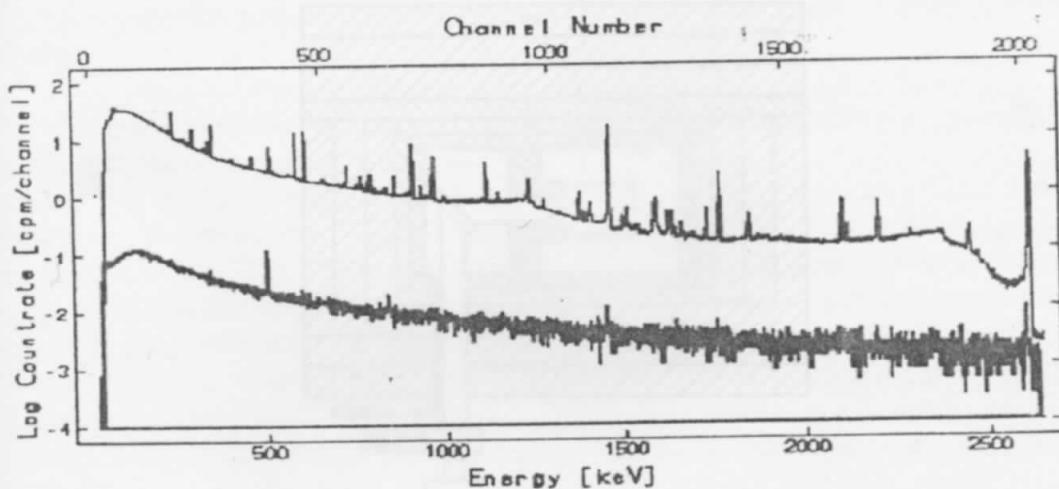
## 2.4. Zaštita niskofonskog sistema na Max Planck Institutu za nuklearnu fiziku – Heidelberg, Nemačka.

Pokrovni sloj laboratorije iznosi 15 mwe, dok su koncentracije primordijalnih radionuklida njenih zidova sledeće: 1200 ppm  $^{40}\text{K}$ , 1.4 ppm Th i 0.9 ppm U.

Detektor pomoću kojeg su snimani fonski spektri je HPGe ( p-tip) koaksijalni detektor , relativne efikasnosti 32 % (  $V \approx 170 \text{ cm}^3$  ) [5].

Zaštita detektora sastoji se , posmatrano u smeru spoljna obloga →detektor , od 5 cm običnog Pb (  $\sim 130 \text{ Bq/kg } ^{210}\text{Pb}$  ), zatim 5 cm “Boliden” Pb (  $\sim 30 \text{ Bq/kg } ^{210}\text{Pb}$  ) i unutrašnjeg sloja starog brodskog Fe debljine 4.5 cm. Zaštita ima oblik kvadra , te je njena debljina posmatrano iz pojedinih pravaca ka detektoru, veća od 14.5 cm.

Na sl. 12. je predstavljen spektar nezaštićenog detektora ( gornji spektar ) i detektora unutar zaštite.



Sl.12. Spektar detektora bez zaštite i detektora sa Pb+Fe štitom

Brzina brojanja u spektru detektora , primenom zaštite , redukovana je približno uniformno za oko 2 reda veličine, izuzev ispod 200 keV i iznad komptonske ivice linije od 2.615 MeV.

Integralni odbroj po jedinici vremena na intervalu 65 keV-2650 keV opao je sa 102 c/s na 0.51 c/s.

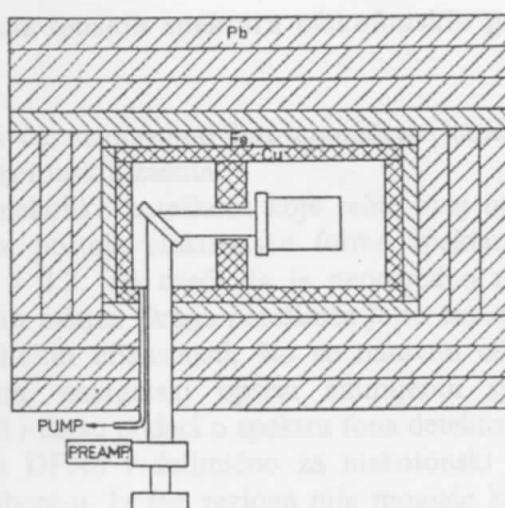
Intenziteti gama linije  $^{40}\text{K}$  ,  $^{208}\text{Tl}$  i anihilacione linije dati su u Tabeli 21.

Tabela 21. Intenziteti dominantnih linija.  $R_0$ –brzina brojanja za detektor bez zaštite koji se nalazi u laboratoriji ,  $R_{\text{Pb+Fe}}$ –brzina brojanja za detektor sa Pb+Fe zaštitom

$E$ [ keV ]	$R_0$ [ c/ ks ]	$R_{\text{Pb+Fe}}$ [ c/ ks ]	$R_{\text{Pb+Fe}}/R_0$ [%]
2614.5 keV	$303.3 \pm 1.7$	$0.38 \pm 0.05$	$0.125 \pm 0.0165$
1460.8 keV	$786.7 \pm 1.7$	$0.27 \pm 0.05$	$0.034 \pm 0.0064$
511 keV	$195.0 \pm 1.7$	$4.83 \pm 0.08$	$2.5 \pm 0.05$

Na osnovu podataka u Tabeli 21. uočava se uspešna redukcija intenziteta linije od 511 keV. Relativni preostali intenzitet  $R_{\text{Pb+Fe}}/R_0$  je 2.5 %. Ako se ovaj iznos uporedi sa ogovarajućom vrednošću relativnog preostalog intenziteta na istoj energiji u slučaju Fe zaštite DFNS , a koja iznosi 7.7 %, onda se objašnjenje za ovu razliku može naći u činjenici da lab. Max Planck instituta leži ispod pokrovnog sloja od 15 mwe. Naime prisustvo ovog sloja dovodi do redukovanja udela anihilacionih gama kvanata koji imaju mionsko poreklo , tako da raste ideo onih anihilacionih gama kvanata koji vode poreklo od visokoenergetskog gama zračenja radionuklida iz okruženja detektora. Zbog toga je, primenom zaštite za detektor , moguće efikasnije ukloniti ove anihilacione gama kvante koji nemaju kosmogeno poreklo i time znatnije doprineti smanjenju intenziteta linije od 511 keV.

Kada je kao štit detektora upotrebljeno 10 cm običnog Pb ( $\sim 130 \text{ Bq/kg}^{210}\text{Pb}$ ), 5 cm "Boliden" Pb ( $\sim 30 \text{ Bq/kg}^{210}\text{Pb}$ ), 2 cm čelika (  $2\text{mBq/kg}^{226}\text{Ra}$ ,  $3\text{mBq/kg}^{60}\text{Co}$  ) i 3 cm elektrolitičkog Cu, sl. 13. integralni odbroj ( 65 keV-2650 keV) je sa 0.51 c/s pao na 0.37 c/s.



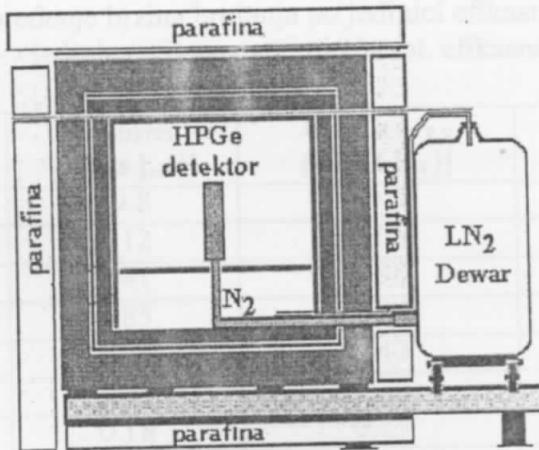
Sl.13. Izgled poboljšane zaštite Ge spektrometra na Max Planck Institutu u Heidelbergu.

Podaci koji su navedeni i komentarisani u poglavljju 2.6. a vezani su za laboratoriju Max Planck Instituta, odnose se na zaštitu detektora sačinjenu od 10 cm Pb i 4.5 cm Fe.

## 2.5. Niskofonska zaštita spektrometarskog sistema Laboratorijske Badan Skaznej Radioaktywnych Srodowiska - IFJ, Krakow, Polska.

Pasivna zaštita za Ge detektor relativne efikasnosti 20 % sastoji se ( od spolja ka unutra ) 8-12 cm parafina, 10 cm običnog Pb, 2 mm Cd, 5 cm Pb starog 2500 godina i 1 cm Cu. U unutrašnjost zaštite ubacuje se gasoviti azot u cilju smanjivanja koncentracije Rn.

Shematski prikaz konstrukcije niskofonskog štita. dat je na sl.14.



Sl.14. Zaštita gama spektrometarskog sistema

Integralni odbroj po jedinici vremena u fonskom spektru na intervalu 80 keV- 3 MeV iznosi 0.88 c/s.

## 2.6. Uporedni prikaz fonskih spektara niskofonskih gama spektrometarskih sistema

U ovom poglavlju će međusobno biti upoređene karakteristike spektara fona prethodno opisanih niskofonskih zaštita.

Postoji, međutim, nekoliko poteškoća koje prate ovaj uporedni prikaz. Prva od njih jeste činjenica da postoje elektronske forme spektara za zaštite opisane u poglavljima 2.1., 2.2. i 2.3. To znači da je neposredno manipulisanje spektrima moguće jedino kod ovih zaštita. Druga poteškoća je to što su fonski spektri snimani pomoću detektora različitih efikasnosti, što se naravno odražava na registrovanu brzinu brojanja. Zatim, energetski opsezi snimljenih spektara nisu identični. Konačno, treba naglasiti i da su podaci o spektru fona detektora van zaštite dostupni u slučaju laboratorije na DFNS i delimično za niskofonski sistem na Max Planck institutu u Heidelberg-u. Iz tog razloga nije moguće kod svih opisanih zaštita utvrditi relativne preostale spektralne intenzitete, već se mogu porebiti apsolutne brzine brojanja detektora smeštenih unutar zaštita.

U Tabeli 22. su predstavljene brzine brojanja po jedinici efikasnosti detektora za fonske spektre snimljene unutar Fe zaštite u lab. DFNS ( kolona 2. ), Pb+Cu zaštite u lab. u Oak Ridge-u ( kolona 3. ) i Pb+Cd+Cu+perspeks zaštite u niskofonskoj lab. u Podgorici ( kolona 4.). Relacija po kojoj su izračunate brzine brojanja po jed. efikasnosti je sledeća

$$R_\varepsilon = \frac{N}{t_{liv} \varepsilon}, \text{ gde je } N \text{ registrovani odbroj ( neto za}$$

fotopik, odnosno ukupni za intervale kontinuuma),  $t_{liv}$  živo vreme,  $\varepsilon$  relativna efikasnost detektora.

Deoba brzine brojanja sa relativnom efikasnošću detektora je izvršena zbog toga što su prva dva spektra dobijena pomoću detektora efikasnosti 32.4 %, a treći spektor pomoću detektora čija je efikasnost 40 %. Izvestan nedostatak ovog pristupa je u tome što je rel. efikasnost detekcije definisana za tačno određenu energiju ( $E_\gamma = 1332$  keV Co-60 ).

Tabela 22. Poređenje brzina brojanja po jedinici efikasnosti detektora  
 (  $j_{\text{eff}}$  - jedinica efikasnosti , tj. 1% rel. efikasnosti )

$E$ [ keV ]	$R_{\varepsilon}$ DFNS [ c/(ks $j_{\text{eff}}$ ) ]	$R_{\varepsilon}$ O. Ridge [ c/(ks $j_{\text{eff}}$ ) ]	$R_{\varepsilon}$ Podgorica [ c/(ks $j_{\text{eff}}$ ) ]
50-1800	49.8	43.5	27.4
100-120	3.12	2.05	1.0
200-220	2.41	1.98	1.03
360-380	0.85	0.87	0.55
540-560	0.36	0.42	0.33
730-750	0.21	0.30	0.21
880-900	0.18	0.23	0.17
1160-1180	0.12	0.15	0.13
1350-1370	0.089	0.105	0.092
1700-1720	0.056	0.052	0.062
74.97 Pb-K $\alpha_1$ (+Bi-K $\alpha_2$ )	0.097±0.022	< 0.047	< 0.020
129.1 $^{228}$ Ac	< 0.071	< 0.065	< 0.023
186.1 $^{226}$ Ra, 185.7 $^{235}$ U	< 0.060	< 0.075	< 0.030
209.3 $^{228}$ Ac	< 0.042	< 0.052	< 0.022
238.6 $^{212}$ Pb	0.16±0.02	0.040±0.023	0.034±0.014
295.2 $^{214}$ Pb	0.23±0.02	0.054±0.023	0.026±0.01
351.9 $^{214}$ Pb	0.40±0.019	0.035±0.021	0.030±0.009
511 ANN	0.53±0.02	0.30±0.025	0.46±0.02
583.2 $^{208}$ Tl	0.044±0.010	< 0.028	< 0.0195
609.3 $^{214}$ Bi	0.34±0.016	0.031±0.013	0.027±0.007
661.6 $^{137}$ Cs	0.010±0.008	< 0.023	< 0.012
768.4 $^{214}$ Bi	0.022±0.009	< 0.027	< 0.011
911.2 $^{228}$ Ac	0.026±0.007	< 0.023	< 0.013
969.0 $^{228}$ Ac	< 0.017	< 0.021	< 0.011
1120.4 $^{214}$ Bi	0.070±0.008	< 0.024	< 0.01
1460.8 $^{40}$ K	0.057±0.007	0.12±0.01	0.057±0.005
1764.6 $^{214}$ Bi	0.052±0.007	0.015±0.006	0.014±0.004

Određeni podaci vezani za fonske spekture svih niskofonskih zaštita opisanih u glavi 2. predstavljeni su u Tabeli 23. Naime, i ovde su date brzine brojanja po jed. efikasnosti detektora.

Tabela 23.  
 Brzine brojanja po jedinici efikasnosti u fonskim spektrima niskofonskih zaštita

$E$ [ keV ]	$R_{\varepsilon}$ DFNS [ c/(ks $j_{\text{eff}}$ ) ]	$R_{\varepsilon}$ O. Ridge [ c/(ks $j_{\text{eff}}$ ) ]	$R_{\varepsilon}$ Podgorica [ c/(ks $j_{\text{eff}}$ ) ]	$R_{\varepsilon}$ Max Planck [ c/(ks $j_{\text{eff}}$ ) ]	$R_{\varepsilon}$ Krakov [ c/(ks $j_{\text{eff}}$ ) ]
50-500	39.2	31.2	17.4	-	-
50-1800	49.8	43.5	27.4	-	-
65-2650	49.2 <sup>1)</sup>	44.0	28.4	15.9	44.0 <sup>2)</sup>
511	0.53±0.02	0.30±0.025	0.46±0.02	0.15±0.003	-
1461	0.057±0.007	0.12±0.01	0.057±0.005	0.0084±0.002	-
2614.5	-	0.02±0.006	0.02±0.004	0.012±0.002	-

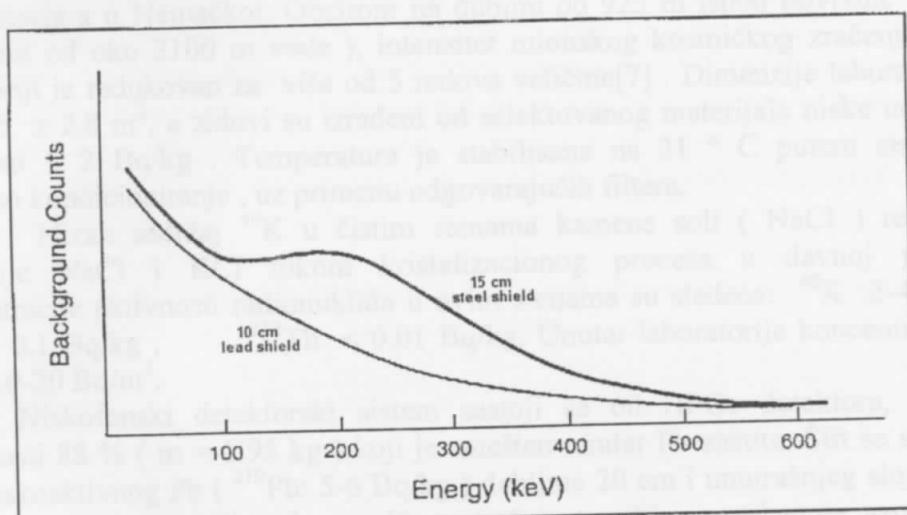
1 ) odnosi se na interval 65 keV-2090 keV ; 2) odnosi se na interval 80 keV-3 MeV

Intenziteti gama linija proizvedenih usled interakcije neutrona sa materijalima koji ulaze u sastav zaštita za detektore navedene su u Tabeli 24.

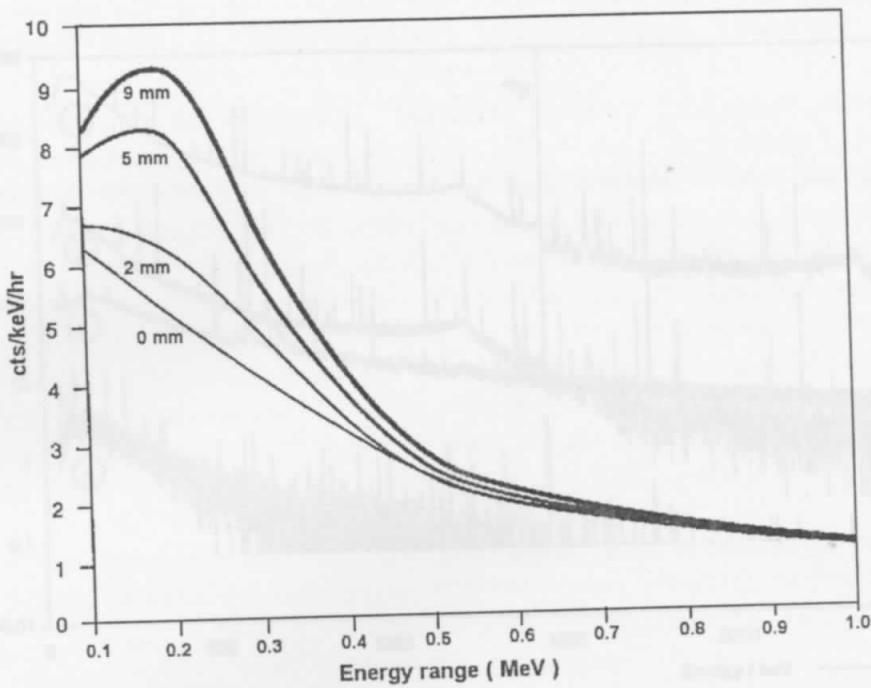
Tabela 24. Karakteristične gama linije uzrokovane neutronima

Laboratorijska zaštitna jedinica	Reakcija / Energija $\gamma$	$R_{\epsilon}$ [ c/(ks jeff) ]
DFNS / Fe	$^{56}\text{Fe}$ (n, n') $^{56}\text{Fe}$ / 846.8 keV	0.038±0.008
Podgorica/Pb+Cd+Cu	$^{113}\text{Cd}$ (n, $\gamma$ ) $^{114}\text{Cd}$ / 558.2 keV	0.022±0.006
Oak Ridge / Pb+Cu	$^{63}\text{Cu}$ (n, n') $^{63}\text{Cu}$ / 669.6 keV 962.1 keV	0.028±0.015 0.024±0.009

Iz Tabele 22. vidi se da na intervalu 50-1800 keV najmanju brzinu brojanja obezbeđuje zaštita detektora u niskofonskoj lab. u Podgorici, dok su brzine brojanja na istom intervalu za zaštite DFNS i Oak Ridge-a veće za 82 %, odnosno 59 % respektivno. Na osnovu Tabele 23. zapaža se da je intenzitet kontinuuma na intervalu 50-500 keV znatno izraženiji kod Fe zaštite ( 25 cm Fe, DFNS ) i Pb+Cu zaštite ( 5 cm Cu, Oak Ridge ), nego što je to slučaj sa Pb+Cd+Cu zaštitom detektora ( 2mm Cu, 1 mm Cd ; Podgorica ). Ovo je u skladu sa činjenicama[6] prikazanim na Sl. 15. i Sl. 16. Moguće je primetiti ( Tabela 23. ) da je debeo sloj Cu kod zaštite u Oak Ridg-u doveo do smanjenja intenziteta linije od 511 keV u poređenju sa intenzitetom iste linije kod zastite u Podgorici, ali se to kao što je pomenuto, znatno odrazilo na porast kontinuuma.



### Sl. 15. Kontinuum fona u zavisnosti od materijala štita



Sl.16. Kontinuum fona kao funkcija debljine unutrašnjeg sloja Cu

Na osnovu Tabele 24. uočava se da je upotreba Cd i Cu kao unutrašnjih slojeva Pb zaštita dovela do pojave izraženih gama linija neutronskog porekla.

### 3. PTB \* podzemna laboratorija za niskofonsku gama spektrometriju

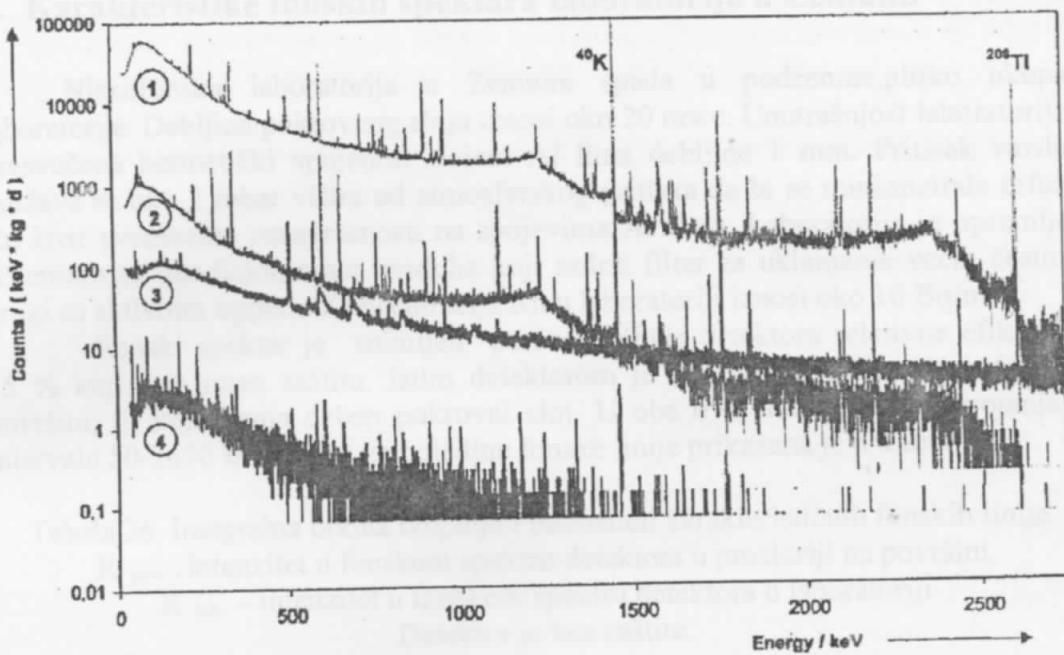
Laboratorija PTB formirana je 1991. godine u rudniku soli Asse kod Braunschwig-a u Nemačkoj. Obzirom na dubinu od 925 m ispod površine zemlje ( ekvivalent od oko 2100 m vode ), intenzitet mionskog kosmičkog zračenja u ovoj laboratoriji je redukovani za više od 5 redova veličine[7] . Dimenzije laboratorije su  $14 \times 3.6 \times 2.8 \text{ m}^3$ , a zidovi su izrađeni od selektovanog materijala niske unutrašnje aktivnosti  $< 2 \text{ Bq/kg}$  . Temperatura je stabilisana na  $21^\circ \text{C}$  putem sistema za vazdušno kondicioniranje , uz primenu odgovarajućih filtera.

Nizak sadržaj  $^{40}\text{K}$  u čistim stenama kamene soli ( NaCl ) rezultat je separacije NaCl i KCl tokom kristalizacionog procesa u davnoj prošlosti. Koncentracije aktivnosti radionuklida u ovim stenama su sledeće:  $^{40}\text{K} 2\text{-}4 \text{ Bq/kg}$  ,  $^{238}\text{U} < 0.1 \text{ Bq/kg}$  ,  $^{232}\text{Th} < 0.01 \text{ Bq/kg}$ . Unutar laboratorije koncentracija Rn iznosi  $10\text{-}20 \text{ Bq/m}^3$ .

Niskofonski detektorski sistem sastoji se od HPGe detektor, relativne efikasnosti 88 % (  $m = 1.95 \text{ kg}$  ) koji je smešten unutar Pb zaštite. Štit se sastoji od sloja niskoaktivnog Pb ( $^{210}\text{Pb}$ : 5-6 Bq/kg) debljine 20 cm i unutrašnjeg sloja čistog elektrolitičkog Cu debljine 1 cm. U unutrašnjost zaštite se ubacuje azot u cilju redukovanja prisustva Rn.

Na slici 17. su uporedo predstavljena 4 fonska spektra dobijena pomoću pomenutog detektora.

\* Physikalisch-Technische Bundesanstalt ( Nacionalni institut za nauku i tehnologiju ), Braunschweig, Germany



SI.17. Fonski spektri HPGe detektora rel.efikasnosti 88%.

1. Spektar detektora bez zaštite na površini Zemlje
2. Spektar detektora bez zaštite u podzemnoj laboratoriji PTB
3. Spektar detektora smeštenog unutar zaštite ( 20 cm Pb+ 1 cm Cu ) na površini Zemlje
4. Spektar detektora smeštenog unutar zaštite ( 20 cm Pb+ 1 cm Cu ) u podzemnoj laboratoriji PTB ( vreme snimanja 4. spektra je 22 dana )

Integralna brzina brojanja u fonskom spektru br. 4 na energijskom intervalu od 40 keV do 2750 keV iznosi  $R_{PTB}=0.012 \text{ s}^{-1} \text{ kg}^{-1}$  (  $0.27 \text{ c/(ks jeff)}$  ) [7]. Ovaj podatak, može se uporediti sa brzinom brojanja niskofonskog sistema u površinskoj laboratoriji na istom energijskom intervalu, kao što je Laboratorija u Oak Ridge-u :  $R_{O.Ridge}=1.75 \text{ s}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ . Dakle  $R_{PTB}/R_{O.Ridge}=0.7\%$ .

U tabeli 25 su dati intenziteti nekih fonskih linija obračunati po jed. efikasnosti.

Tabela 25. Intenziteti fonskih linija. Relativne merne nesigurnosti kreću se u intervalu 10-20 %.

$E[\text{keV}]$	$R_{e PTB}$ [ $\text{c/(ks jeff)}$ ]
511 keV	$7.9 \times 10^{-4}$
1461 keV	0.0014
2614.5	$2.6 \times 10^{-4}$

Poređenjem ovih vrednosti sa podacima za niskofonske sisteme datim u Tabeli 23. ( poglavljje 2.6), uočava se prednost postavljanja detektorske zaštite duboko ispod površine Zemlje, pri čemu sadržaj radionuklida u stenama koje okružuju zaštitu mora biti nizak.

#### 4. Karakteristike fonskih spektara laboratorije u Zemunu

Niskofonska laboratorija u Zemunu spada u podzemne, plitko ukopane laboratorije. Debljina pokrovnog sloja iznosi oko 20 mwe. Unutrašnjost laboratorije je presvučena hermetički spojenim slojem Al lima debljine 1 mm. Pritisak vazduha održava se oko 2 mbar višim od atmosferskog pritiska da bi se minimizirala difuzija Rn kroz eventualne nesavršenosti na spojevima Al sloja. Laboratorija je opremljena sistemom za kondicioniranje vazduha koji sadrži filter za uklanjanje većih čestica i drugi sa aktivnim ugljem. Koncentracija Rn u laboratoriji iznosi oko  $10 \text{ Bq/m}^3$ .

Fonski spektar je snimljen pomoću HPGe detektora relativne efikasnosti 15 % koji nije imao zaštitu. Istim detektorom je snimljen spektar u prostoriji na površini, tj. koja nema debeo pokrovni sloj. U oba ova slučaja brzina brojanja na intervalu 50-2650 keV, kao i za pojedine fonske linije prikazana je u Tabeli 26.

Tabela 26. Integralna brzina brojanja i intenziteti karakterističnih fonskih linija .

$R_{\text{pov.}}$  - intenzitet u fonskom spektru detektora u prostoriji na površini,

$R_{\text{lab.}}$  - intenzitet u fonskom spektru detektora u laboratoriji

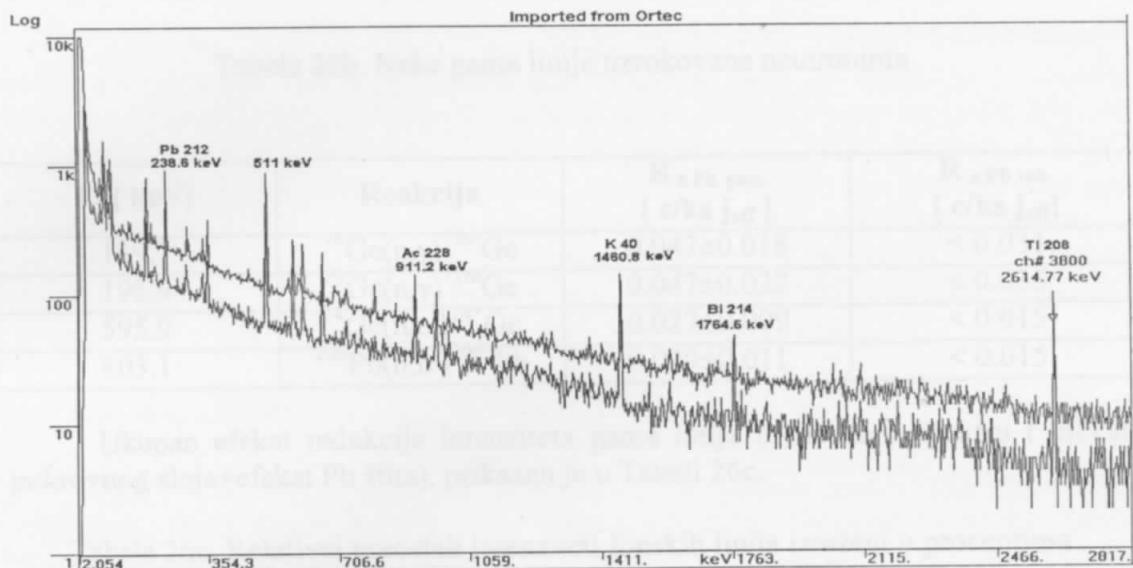
Detektor je bez zaštite.

E[ keV ]	$R_{\text{pov.}}$ [ c/ks ]	$R_{\text{lab.}}$ [ c/ks ]
50-2650	78 815	73 977
295.2	$142.7 \pm 2.7$	$119.1 \pm 1.4$
351.9	$260.0 \pm 2.6$	$215.9 \pm 1.7$
511( ANN+ $^{208}\text{TI}$ )	$89.1 \pm 2.2$ $\sim 60$ (ANN)+30 ( $^{208}\text{TI}$ )	$74.2 \pm 1.2$ $\sim 54$ (ANN)+20 ( $^{208}\text{TI}$ )
583.2	$113.2 \pm 2.0$	$142.6 \pm 1.4$
609.3	$241.7 \pm 2.0$	$205.5 \pm 1.2$
1460.8	$410.4 \pm 1.8$	$652.6 \pm 1.3$
2614.5	$97.4 \pm 0.8$	$96.7 \pm 0.5$

Na osnovu Tabele 26. vidi se da smanjenje brzine brojanja detektora na intervalu 50-2650 keV nije značajno (oko 6%). Intenzitet linije od 511 keV je manji za oko 17%. Zapaža se smanjenje intenziteta postradonskih linija, međutim, vidljiv je porast intenziteta linije  $^{40}\text{K}$  i to za  $\approx 60\%$ ! Poređenjem intenziteta linija  $^{208}\text{TI}$  na 583.2 keV, odnosno 2614.5 keV, u spektru snimljenom na površini i spektru unutar laboratorije, očigledno je da postoji znatna razlika u distribuciji  $^{208}\text{TI}$  koji se nalazi u okruženju detektora tokom snimanja spektra na jednoj i drugoj poziciji. Na ovo ukazuje uočljiva razlika u intenzitetu linije od 583.2 keV i gotovo isti intenzitet linije od 2614.5 keV na obe pozicije.

Treba zapaziti da postavljanje detektora u laboratoriju dovodi do njegovog potpunog okruživanja ( $4\pi \text{ sr}$ ) zemljištem u koje je laboratorija ukopana, za razliku od situacije kada se on nalazi u površinskoj prostoriji. Zbog ovakve geometrije, budući da koncentracija radionuklida u okolnom zemljištu nije niska (kao npr. u slučaju PTB laboratorije), integralni odbroj je slabo redukovani. Efekat  $4\pi$  geometrije je jasno vidljiv na primeru linije  $^{40}\text{K}$ . Mada je koncentracija Rn u vazduhu niska, ne treba zanemariti uticaj Rn, odnosno njegovih potomaka koji se nalaze između Al lima i zida laboratorije, kao ni činjenicu da detektor vidi veliku zapreminu laboratorije.

Kao zaštitni materijal detektora, upotrebljeno je Pb, čija debljina iznosi 10 cm. Fonski spektri detektora unutar zaštite snimljeni su u prostoriji na površini, kao i u laboratoriji. Uporedni prikaz oba spektra dat je na Sl.17a.



Sl.17a. Komparacija spektara fona snimljenih u prostoriji na površini ( gornji spektar ) i u laboratoriji( donji spektar ). Detektor je unutar Pb zaštite sa zidom debljine 10 cm.

Uočava se da je spektralni kontinuum gotovo uniformno snižen na celokunom energetskom intervalu zahvaljujući postavljanju detektora ispod sloja zemljišta od oko 20 mwe. Brzine brojanja na intervalu 50-2650 keV, kao i za određene fonske linije u spektrima sa Sl.17a date su u tabeli 26a.

Tabela 26a. Integralna brzina brojanja i intenziteti karakterističnih fonskih linija .  
 $R_{\varepsilon \text{ Pb pov.}}$  - intenzitet po jedinici efikasnosti u fonskom spektru detektora u prostoriji na površini ( zaštita :10 cm Pb )  
 $R_{\varepsilon \text{ Pb lab.}}$  – intenzitet po jedinici efikasnosti u fonskom spektru detektora u laboratoriji ( zaštita : 10 cm Pb )

$E[\text{ keV}]$	$R_{\varepsilon \text{ Pb pov.}}$ [ c/ks $j_{\text{eff}}$ ]	$R_{\varepsilon \text{ Pb lab.}}$ [ c/ks $j_{\text{eff}}$ ]
50-2650	54.8	29.0
65-2650	52.1	27.4
295.2	$0.055 \pm 0.018$	$0.052 \pm 0.017$
351.9	$0.099 \pm 0.016$	$0.081 \pm 0.015$
511	$0.69 \pm 0.023$	$0.25 \pm 0.02$
583.2	$0.107 \pm 0.016$	$0.086 \pm 0.014$
609.3	$0.098 \pm 0.015$	$0.055 \pm 0.013$
1460.8	$0.069 \pm 0.008$	$0.124 \pm 0.010$
2614.5	$0.062 \pm 0.006$	$0.060 \pm 0.007$

Intenziteti pojedinih gama linija koje nastaju u interakciji Ge, odnosno Pb sa neutronima, predstavljene su u Tabeli 26b. Uočava se da je pokrovni sloj laboratorije doveo do opadanja intenziteta neutronskih linija.

Tabela 26b. Neke gama linije uzrokovane neutronima

$E_\gamma$ [ keV ]	Reakcija	$R_{\text{e Pb pov.}}$ [ c/ks $\text{jeff}$ ]	$R_{\text{e Pb lab.}}$ [ c/ks $\text{jeff}$ ]
139.7	$^{74}\text{Ge}(n,\gamma)^{75m}\text{Ge}$	$0.047 \pm 0.018$	$< 0.031$
198.9	$^{70}\text{Ge}(n,\gamma)^{71m}\text{Ge}$	$0.047 \pm 0.022$	$< 0.035$
595.9	$^{74}\text{Ge}(n,n)^{74^*}\text{Ge}$	$0.027 \pm 0.009$	$< 0.015$
803.1	$^{206}\text{Pb}(n,n)^{206^*}\text{Pb}$	$0.029 \pm 0.011$	$< 0.015$

Ukupan efekat redukcije intenziteta gama linija u fonskom spektru (efekat pokrovnog sloja+efekat Pb štita), prikazan je u Tabeli 26c.

Tabela 26c. Relativni preostali intenziteti fonskih linija izraženi u procentima

$R_{\text{pov}}$  - detektor bez zaštite na površini

$R_{\text{Pb lab}}$  - detektor sa Pb zaštitom u laboratoriji

$E$ [ keV ]	$R_{\text{Pb lab.}}/R_{\text{pov.}}$ [ % ]
50-2650	0.55
295.2	$0.55 \pm 0.20$
351.9	$0.47 \pm 0.09$
511 ( ANN+ $^{208}\text{TI}$ )	$4.2 \pm 0.35$
511 ANN	$\sim 6.3 \%$
583.2	$1.1 \pm 0.2$
609.3	$0.34 \pm 0.08$
1460.8	$0.45 \pm 0.04$
2614.5	$0.92 \pm 0.1$

Podaci iz Tabele 26a upoređeni sa odgovarajućim podacima iz Tabele 23, ukazuju da su u niskofonskoj laboratoriji u Zemunu obezbeđeni uslovi za postizanje niske brzine brojanja u spektru fona već primenom samo 10 cm Pb zaštite. Iz Tabele 26c se uočava da je integralni odbroj detektora redukovani oko 180 puta (1/0.0055). Dalje unapređenje zaštite detektora, posebno na planu postavljanja unutrašnjeg zaštitnog sloja dodatno bi snizilo fonski odbroj.

Karakteristike zaštite, odnosno fonskih spektara analiziranih u prethodnim poglavljima, uzete su u obzir prilikom izrade zaštite za GMX HPGe detektor u Lab. za nuk. fiziku DFNS.

GMX Laboratorija Sloboda je u obvezu preuzeo GMX I detektor zaštite za GMX HPGe detektor. Detektor je model Na-37Hg-A kojemu omogućava rad u temperaturama do 100°C. Detektor je snestan sredinom 100-150°C i raspolaže zaštitom od 10 mm Pb. Detektor je snestan sredinom 100-150°C i raspolaže zaštitom od 10 mm Pb. Specijalna putanja je pridružena da će minimizirati izlaganje svim konstrukcijskim

## **5. Izrada zaštite za detektor HPGe GMX u Laboratoriji za nuklearnu fiziku Departmana za fiziku u Novom Sadu**

Nabavka HPGe detektora rel. efikasnosti 32.4 % , model LLB-GMX-HJ zahtevala je izradu zaštite specijalno dizajnirane za ovaj tip detektora i njegovu kriostatsku konfiguraciju. Postizanje niskog nivoa fonske brzine brojanja, koja bi omogućila odgovarajuća merenja vezana za projekat CRESST, osnovni je motiv konstruisanja kvalitetne detektorske zaštite. Pomenuti projekat ima izuzetan značaj u savremenoj fizici , a doprinos njegovoj realizaciji daje DFNS, kao i Fizički fakultet u Beogradu. Osnove projekta CRESST predstavljene su u poglavlju 5.1. Sledeće poglavlje, 5.2., govori o izboru materijala za zaštitu HPGe GMX detektora , postupku izrade delova zaštite i njihovog povezivanja u jedinstvenu celinu.

### **5.1. Projekat CRESST**

Naziv CRESST potiče od početnih slova sledeće grupe engleskih reči: Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometers, što znači "kriogeničko traženje retkog događaja pomoću superprovodnih termometara". Eksperimentalna postavka se nalazi u "Nacionalnoj laboratoriji Gran Saso" u Italiji. Eksperiment je dizajniran za detekciju čestica tamne materije , odnosno WIMP-ova( Weakly Interacting Massive Particls) [23].

Kao što je poznato, oko 90% ukupne materije u svemiru predstavlja tamna materija, tj. materija koja ne emituje elektromagnetsko zračenje, ali čiji je gravitacioni uticaj uočljiv.

CRESST koristi niskofonske kriogeničke kalorimetrijske detektore sa termomerima baziranim na superprovodnom faznom prelazu za direktnu detekciju rasejanja WIMP-ova na jezgru.

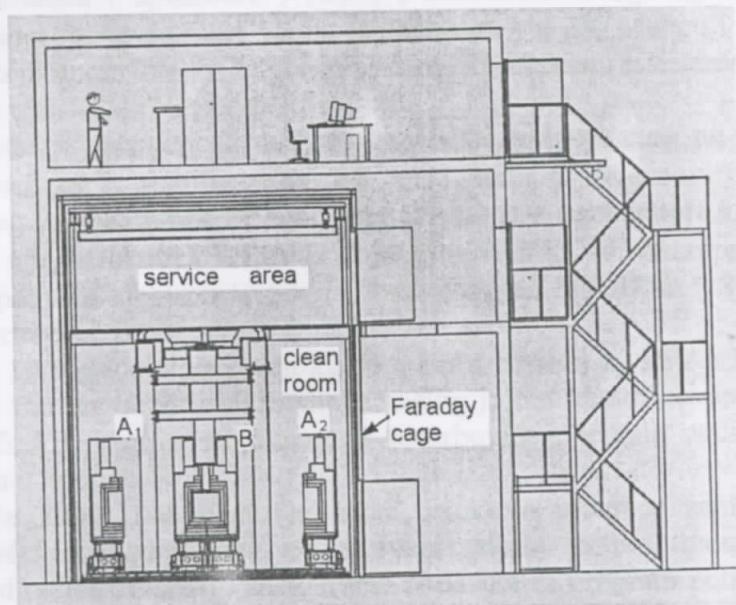
Naime, na osnovu teorijskih razmatranja očekuje se interakcija WIMP-ova sa "običnom" materijalom putem elastičnih rasejanja na jezgrima. Stoga su sve direktnе metode , pa i CRESST fokusirane na ovu mogućnost. Konvencionalne metode za direktnu detekciju zasnovane su na ionizaciji ili scintiliranju uzrokovanim uzmakom jezgra. Ovo vodi ozbiljnim ogranicenjima povezanim sa relativno visokom energijom neophodnom za ostvarivanje ionizacije i sa oštrim opadanjem efikasnosti ionizacije sa usporenjem jezgra.

Kriogenički detektori razvijeni za CRESST koriste pobudjenja za koja je potrebna znatno niža energija: f o n o n e. Budući da je generisanje fonona ( uzrokovano uzmakom jezgra prilikom rasejanja WIMP-a ) mnogo verovatniji proces nego ionizacija, kriogenički kalorimetri su idealni za detekciju WIMP-ova.

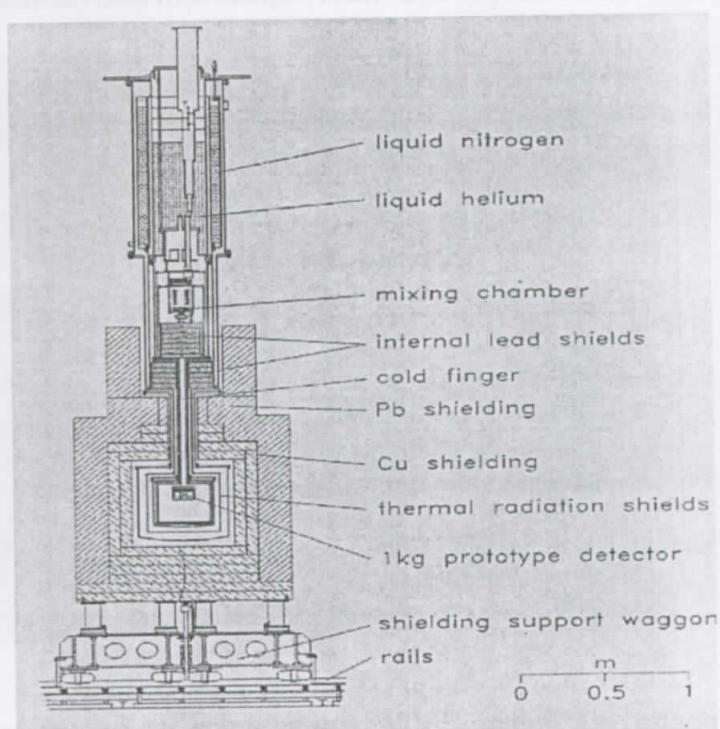
#### **5.1.1 Eksperimentalna postavka**

Od 1995. do 1998 godine CRESST eksperiment je bio postavljen u halu B Gran-Saso laboratorije. Slika 18. shematski prikazuje CRESST-ovu eksperimentalnu zgradu. Centralni dio sadrži He-3/He-4 kriostat koji omogućava održavanje operativne temperature detektora ( 10 mK – 15 mK). Detektor je smešten unutar tzv. " rashladne kutije" koja je proizvedena od niskofonskog OFHC bakra ( Sl. 19.). Specijalna pažnja je preduzeta da se minimizira izlaganje svih konstrukcionih

materijala kosmičkim zracima. Hlađenje detektora omogućeno je putem 1.3 m dugog "cold finger-a" koji u unutrašnjost rashladne kutije vodi od kriostata. "Cold finger" je napravljen od visokočistog bakra i okružen je različitim radijacionim štitovima. Kriostat i rashladna kutija se nalaze unutar Faradejevog kaveza kako bi se minimizirali eksterni uticaji elektromagnetskog polja.



Sl. 18. Eksperimentalna zgrada



Sl.19. Detektor sa kriostatom

### 5.1.2 CRESST I faza

Nakon prototipske rashladne kutije koja je zamenjena finalnom 1998. godine , prva merenja koja bi karakterisala fon mogla su biti započeta.

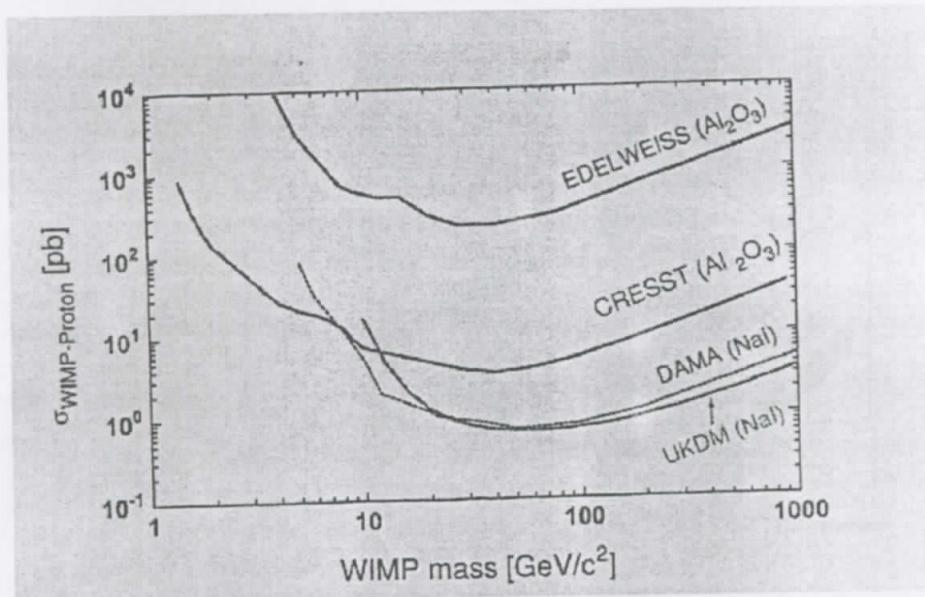
Niskotemperaturski kalorimetarski detektor korišten u CRESST I fazi sastoji se od safirskog kristala ( apsorbera )  $\text{Al}_2\text{O}_3$  , ekstremno osetljivog superprovodnog termometra ( sposobnog da meri porast temperature ) u  $\mu\text{K}$  opsegu i slabe termalne veze sa tzv. " topotnom kadom "da bi se obezbedila relaksacija sistema ( odvođenjem topline) nakon interakcije čestice sa kristalom.

Termometar je načinjen od volframskog filma evaporiranog na safirski kristal. Njegova temperatura je stabilizovana na  $\approx 15 \text{ mK}$  , u prelaznom regionu između superprovodnog i normalno-provodnog stanja. Mali rast temperature kristala ( tipično nekoliko  $\mu\text{K}$  ) npr. uzrokovani WIMP-om na jezgru , vodi ka porastu otpornosti W filma koja se meri pomoću elektronskog kola baziranog na SQUID-u ( Superconducting Quantum Interference Device ).

Sa nekih 10 događaja/ keV dan kg u opsegu između 10 keV i 100keV , fon je bio u početku viši nego što je očekivano. Razlog je bio identifikovan : nađeno je da korišćenje safirskih kuglica za fiksiranje apsorbujućeg kristala vodi ka formiraju mikropukotina u kristalu.

U proleće 2000., nakon što je držač detektora usavršen zamenom safirskih kuglica sa teflonskim delovima, registrovani odbroj je bio uporediv sa fonom očekivanim od radioaktivnosti i sakupljanje podataka za program potrage za tamnom materijom je mogao da počne.

Eksperimentalna faza CRESST I je završena 2000. godine. Donela je novu granicu[25] za spin-zavisnu interakciju WIMP-ova sa protonima ( sl. 20.).



Sl.20. Granična kontura za spin-zavisnu WIMP interakciju ustanovljena pomoću CRESST I posmatranja , zajedno sa rezultatima drugih eksperimenata. Oblast iznad krive je isključena na nivou poverenja od 90 % za odgovarajući eksperiment.)

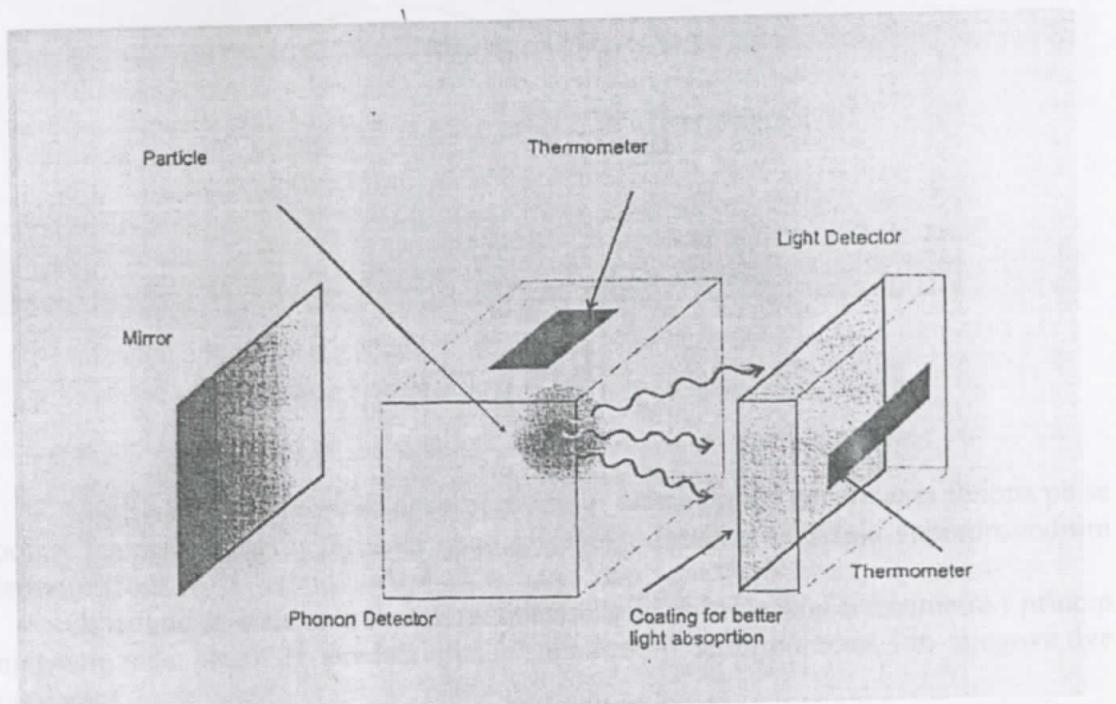
CRESST I period sakupljanja podataka obuhvata podatke snimljene u merenjima tokom 67 dana ( 04/2000 – 07/2000 ) sa dva 262 g safirska detektora.

Fonski odbroj u energetskom opsegu od 15 keV do 20 keV je bio (  $0.93 \pm 0.35$  ) counts / kg keV day.

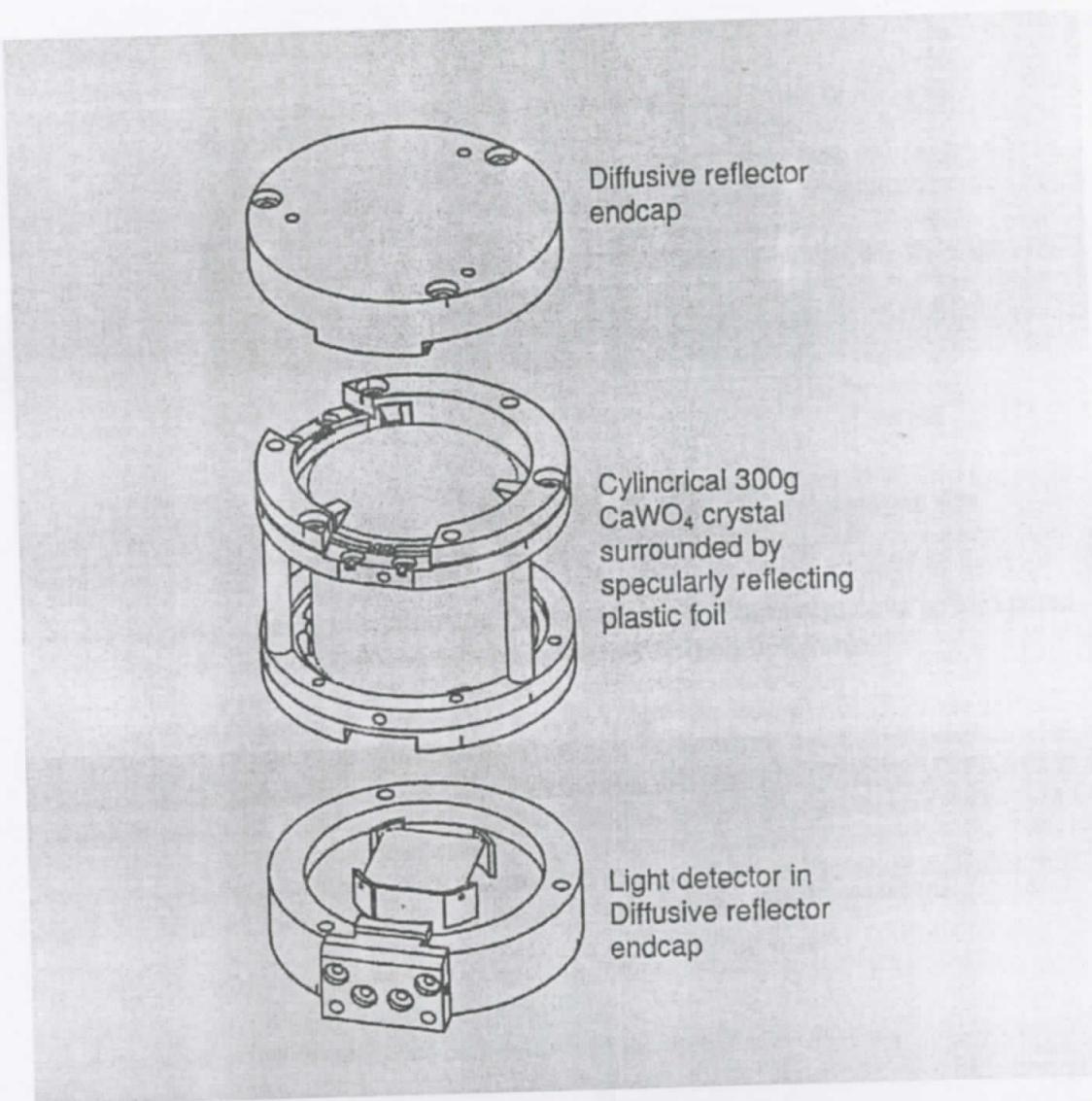
### 5.1.3. Druga faza CRESST-a . Simultana svetlosna i fononska detekcija

Za CRESST II program primjenjen je usavršen detektorski koncept. On je baziran na koincidentnoj detekciji fonona i scintilacionog svetla kreiranog u apsorbujućem kristalu nakon interakcije čestice sa kristalnom rešetkom[24].

U potrazi za česticama tamne materije veoma je značajna mogućnost diskriminacije između uzmaka elektrona ( uzrokovanih fotonima ili elektronima ) i uzmaka jezgara ( uzrokovanih česticama tamne materije, ali takođe i neutronima ). Ovim se u velikoj meri redukuje fon , čime raste verovatnoća za potvrdu detekcije WIMP-ova. Umesto safirskog kristala , koristi se CaWO<sub>4</sub> monokristal kao apsorber. CaWO<sub>4</sub> ima dobre scintilacione karakteristike, mada mu je nedostatak dugo vreme "gorenja". Na kristal je evaporiran superprovodni volframski film za detekciju f o n o n a. Scintilaciono svetlo se registruje u koincidenciji sa fononima i to pomoću drugog – safirskog kriogeničkog detektora na kome se takođe nalazi volframski film. Ovaj svetlosni detektor je u kontaktu sa fononskim CaWO<sub>4</sub> detektorom, a radi bolje apsorpcije svetlosti , kontaktna strana safirskog detektora je prekrivena slojem silicijuma. Sl.21. shematski prikazuje postavku ovog kompozitnog detektora, a Sl. 22. njegov realni izgled.



Sl.21. Shematski prikaz detektora



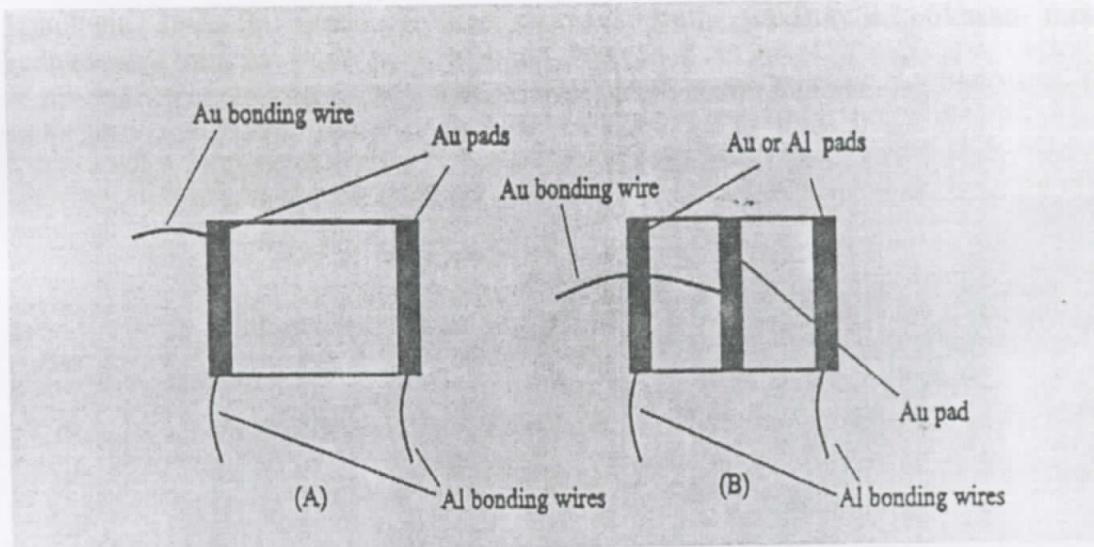
Sl.22. Realni izgled detektora sa odgovarajućim nosačem

U safirskom detektoru se apsorbuju fotoni , čime dolazi generisanja fonona pa se porast temperature ovog kristala kao i CaWO<sub>4</sub> kristala detektuje superprovodnim termometrom.

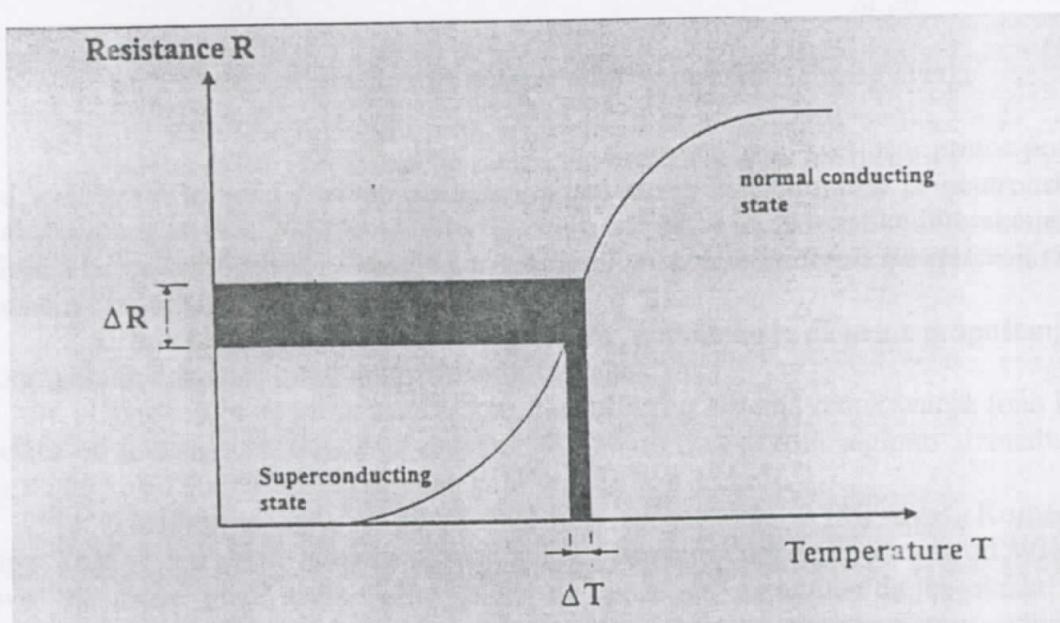
Osvrнимо се сада за trenutak na konstrukciju volframskog termometra i princip njegovog rada. Na sl. 23. predstavljen je shematski ovaj termometar, i то njegove dve varijante.

Dijagram koji prikazuje на ћему је базиран рад овог термометра дат је на sl.24. Као што видимо, малим променама температуре одговара relativno velika промена otpora када је W film u temperaturnoj oblasti која се налази на прелазу normalnog проводног stanja u superprovodno stanje.

neige, leteći čestici i ionizaciju, ali takođe i smanjenje elektronih i gama kvanta.



Sl.23. Konstrukcija W termometara. Putem dveju Al žica omogućava se električni kontakt, dok Au žica služi za termalno kuplovanje



Sl.24. Princip rada W termometra

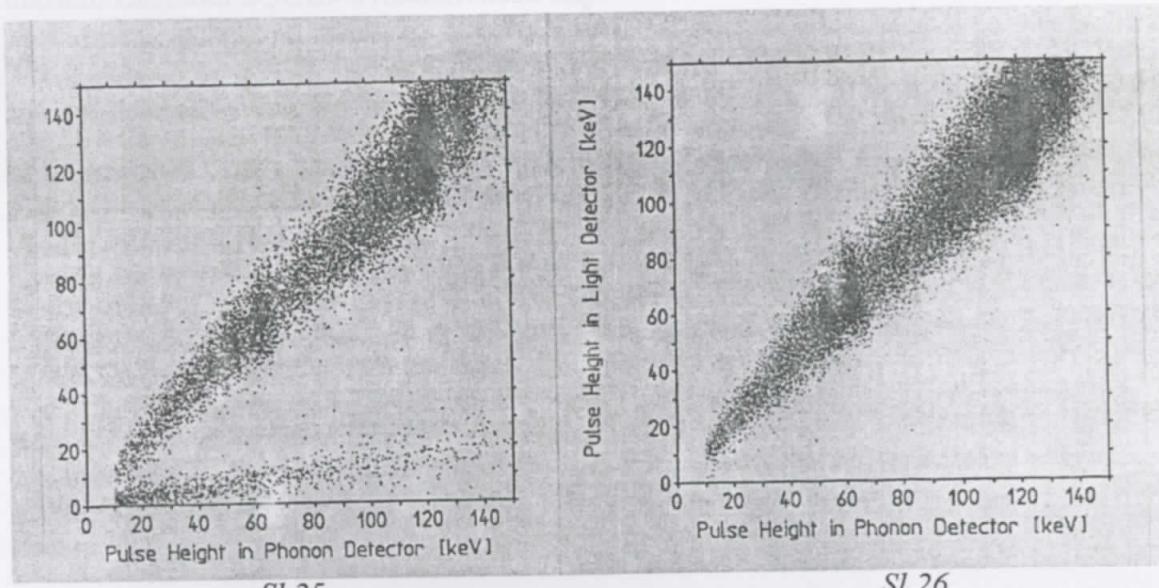
Koincidentna detekcija fonona i scintilacionog svetla dovodi do potiskivanja fona u poređenju sa fonom prisutnom samo u fonoonskim merenjima. Razlog je taj što je za datu energiju upadne čestice, odnos deponovane energije u fononskom kanalu i deponovane energije u svetlosnom kanalu zavisí od tipa interakcije[24].

Naime, uzmaci jezgara koji se dešavaju prilikom rasejanja WIMP-ova ili neutrona dovode do emitovanja znatno manje scintilacionog svetla u scintilatoru ,

nego što to čine ionizacione interakcije kakve su apsorpcija elektrona ili gama kvanata ( gde se javljaju elektronski uzmaci ).

Pošto se većina fonskih interakcija bazira na ionizacionim interakcijama , simultana detekcija fonona i scintilacionog svetla predstavlja efikasan metod redukovanja fona.

Sl. 25. i 26. ilustruju potencijal ovog detekcionog metoda.



Sl.25.

Sl.26.

Sl. 25. i 26. : Koincidentna detekcija fonona i scintilacionog svetla

Sl. 25.: Donja tačkasta grupacija kojoj odgovara niski svetlosni prinos potiče od *nuklearnih uzmaka (uzmaka jezgara)*, uzrokovanih neutronima iz neutronskog kalibracionog izvora. WIMP-ovi treba da imaju iste takve karakteristike interakcije. Gornja tačkasta grupacija nastala je kao rezultat *ionizacionih interakcija elektrona i gama zraka* sa  $\text{CaWO}_4$  kristalom.

Sl. 26.: Uklanjanjem neutronskog izvora , potvrđeno je da nema propuštanja ionizacionih događaja u region nuklearnih uzmaka.

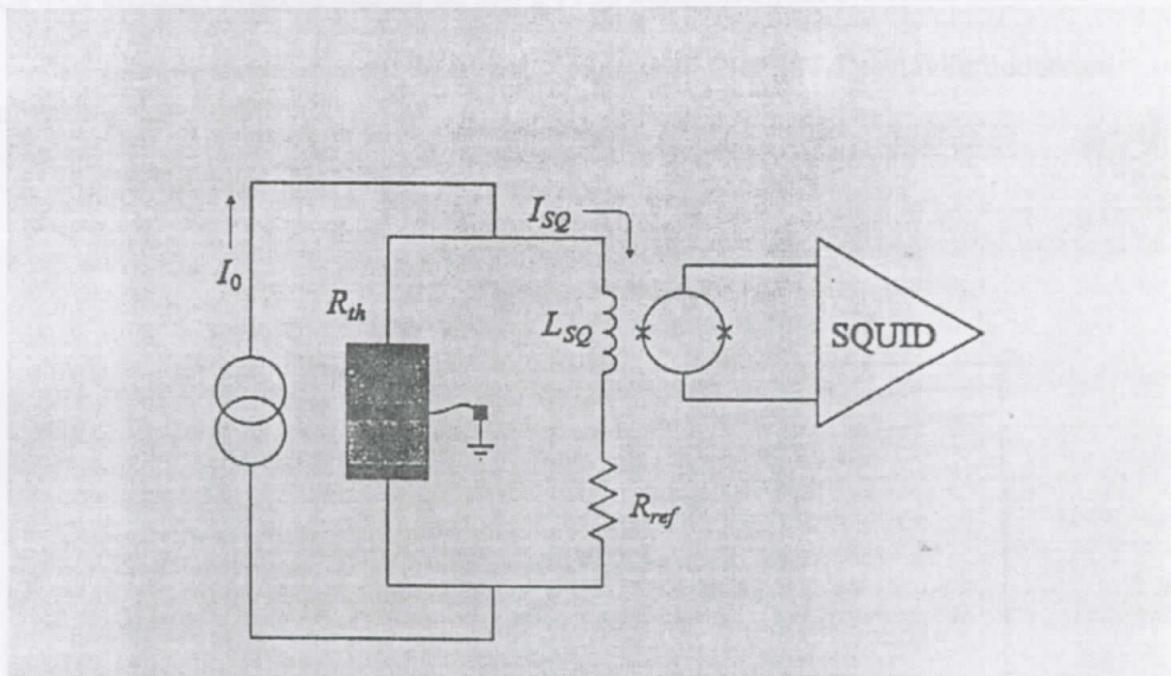
Utvrđeno je da ovim konceptom detektorskog sistema redukovanje fona koji potiče od ionizacionih događaja dostiže 99.7 % u energetskom regionu između 15 keV i 25 keV i 99.9 % na energijama koje prevazilaze 25 keV.

Osvrнимо се sada na mogućnost potvrde detekcije WIMP-ova . Komentar tipa "kada se fon svede na nulti odbroj, svi registrovani događaji potiče od WIMP-ova" ne može imati utemeljenje. Niko ne može da garantuje da će ikada biti postignuto da *nijedan* fonski događaj ne daje doprinos registrovanom odbroju. Događaji koji potiču od WIMP-ova i fonski događaji daju rezultujući zajednički doprinos, te moramo naglasiti da bez primene simulacije fonskih događaja , ma kako oni bili retki , ne možemo biti sigurni da neki od registrovanih događaja jesu baš porekлом od interakcije WIMP-ova.

Moguće je, međutim , kroz dugi vremenski period posmatrati da li se javljaju oscilacije u intenzitetu fona , pošto teorija predviđa dugoperiodične oscilacije u intenzitetu fluksa WIMP-ova uzrokovanih kretanjem Zemlje oko Sunca. Možda bi se iz eventualno registrovanih oscilacija mogli izvesti zaključci koliko su događaji koji ne potiču od WIMP interakcija uspešno redukovani.

#### 5.1.4. Kolo za »čitanje« izlaza sa superprovodnog termometra

Male promene električnog otpora superprovodnog termometra mere se pomoću SQUID-a ( Superconducting Quantum Interference Device ) [23]. Odgovarajuće elektronsko kolo, prikazano na sl. 27. , sastoji se od dve paralelne grane – jedne sa termometrom otpornosti  $R_{th}(T)$  i druge sa referentnim otporom  $R_{ref}$  u serijskoj vezi sa ulaznim kalemom SQUID-a induktivnosti  $L_{SQ}$  .



Sl. 27. Shematski dijagram kola za » čitanje«

Konstantna struja  $I_0$  se deli u dve grane , pri čemu je jačina struje kroz kalem SQUID-a data sa:

$$I_{SQ} = I_0 \frac{R_{th}}{R_{th} + R_{ref}}$$

DC SQUID meri magnetni fluks  $\phi_{in}$  kuplovan sa njegovom ulaznom petljom ( superprovodni prsten prekinut dvama Džozefsonovim spojevima prikazanim kao dva »krstića« vidljiv je na sl.27.).

Ovaj magnetni fluks i struja  $I_{SQ}$  povezani su relacijom :

$$\phi_{in} = M_{SQ} I_{SQ} ,$$

pri čemu je  $M_{SQ}$  koeficijent međusobne indukcije sistema kalem – prsten. Kada čestica deponuje energiju u kristal, temperatura a time i otpor termometra rastu, tako da veća struja  $I'_{SQ} = I_{SQ} + \Delta I_{SQ}$  protiče kroz kalem.

Za male varijacije otpora  $\Delta R_{th}$  , strujni signal dat je jednačinom:

$$\Delta I_{SQ} \approx I_0 \frac{R_{ref}}{(R_{th} + R_{ref})} \Delta R_{th} .$$

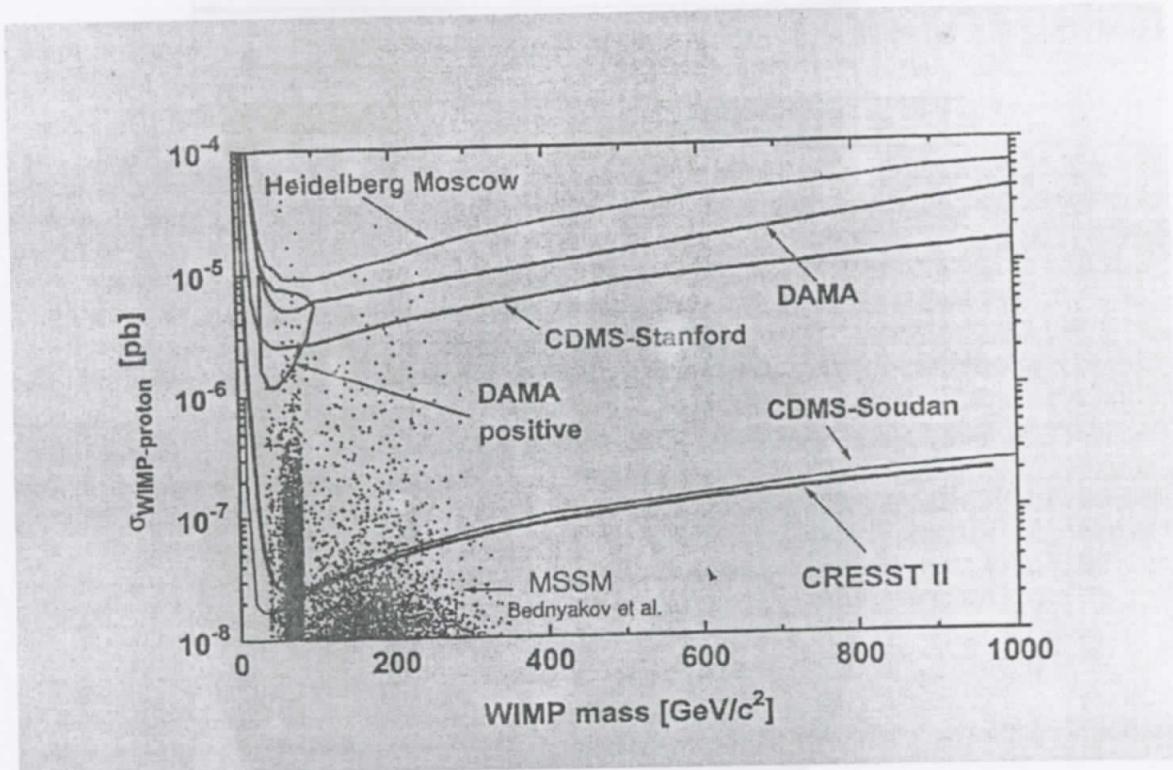
Dakle, svaka promena struje  $I_{SQ}$  vodi promeni magnetnog fluksa  $\phi_{in}$  .

### 5.1.5 Planovi i perspektive za CRESST II

CRESST II će nakon kompletiranja postavke imati sledeće karakteristike[25] :

- koincidentna detekcija fonona i scintilacionog svetla
- ukupna detektorska masa od 10 kg realizovana kao segmentna instalacija 33 CaWO<sub>4</sub> kristala ( svaki sa masom od 300 g ) i 33 kalorimetrijska svetlosna detektora
- spoljni radijacioni štit, usavršen u odnosu na CRESST I postavku dodatkom mionskog veta i neutronskega štita

Sl. 28. ilustruje očekivanja.



Sl. 28. WIMP-nukleon granice preseka za skalarnu (koherentnu) interakciju (90% nivo poverenja) kao funkcija WIMP mase, očekivana za 10 kg CaWO<sub>4</sub> detektor sa odbacivanjem fona od 99.7 % iznad detektorskog praga od 15 keV i 3 godine merenja u CRESST-ovoj postavci u Gran Sasu.

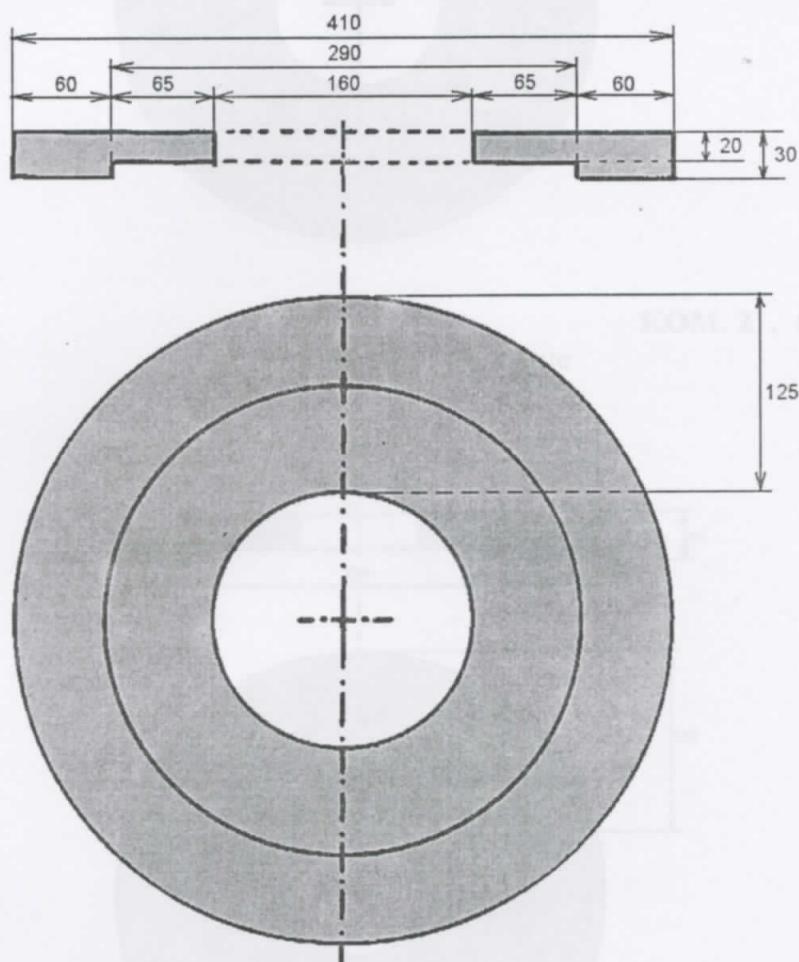
Značajan problem u ovom projektu jeste dobijanje monokristala CaWO<sub>4</sub> koji imaju visoku radiočistoću. Naročitu smetnju predstavlja prisustvo alfa emitera unutar samog kristala jer upravo oni daju doprinos događajima koji se registruju kao nuklearni uzmaci (Sl. 25. – donja tačkasta grupacija). Obzirom da je radioaktivni raspad praćen emisijom gama zračenja, uloga gama spektrometrije u ispitivanju sadržaja radionuklida u supstancama WO<sub>3</sub> i CaCO<sub>3</sub> iz kojih se dobija CaWO<sub>4</sub> ima izuzetan značaj. Važno je i ispitivanje kvaliteta dobijenog monokristala jer je

kontaminacija moguća u toku samog procesa produkcije monokristalne forme  $\text{CaWO}_4$ , kao i završne obrade koja uključuje poliranje.

## 5.2. Materijal za zaštitu HPGe GMX detektor a i delovi konstrukcije

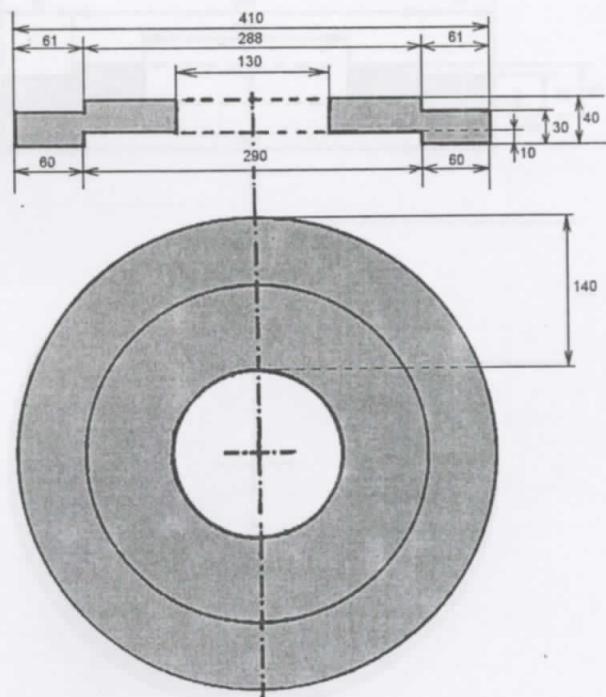
Kao zaštitni materijal za detektor odabранo je staro Pb dobijeno topljenjem vodovodnih cevi koje više nisu bile u upotrebi. U toku procesa topljenja otklonjene su sve nečistoće koje su se pojavile na površini rastopa. U cilju dobijanja odgovarajućih delova Pb zaštite topljenjem, prethodno su izrađeni kalupi od suvog drveta lipe.

Na slikama 29-34. prikazan je izgled izlivenih Pb delova, njihove dimenzije ( u mm ) broj potrebnih delova i masa svakog dela. Kako su ovi delovi integrisani u jedinstven objekat vidljivo je na Sl.35 .



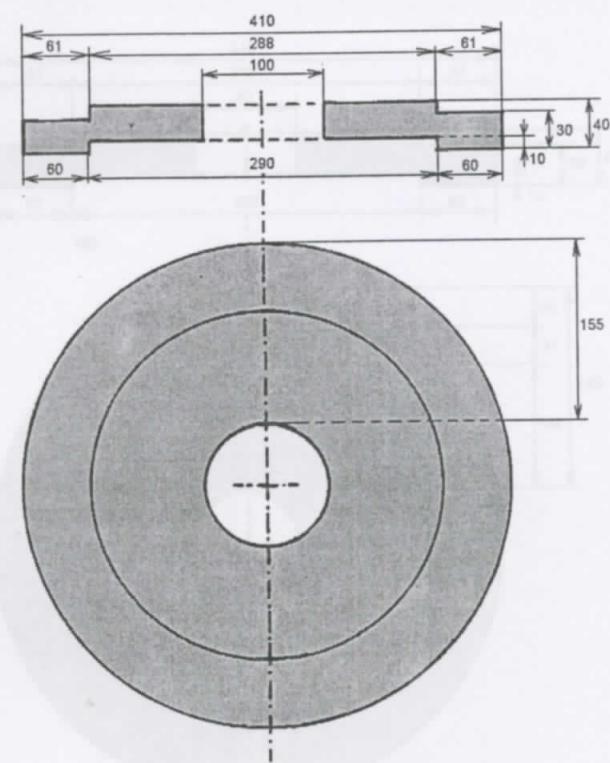
KOM. 1 ,  $m_A = 30.21 \text{ kg}$

Sl. 29. Deo "A" Pb zaštite



**KOM. 2 ,  $m_B=40.6 \text{ kg}$**

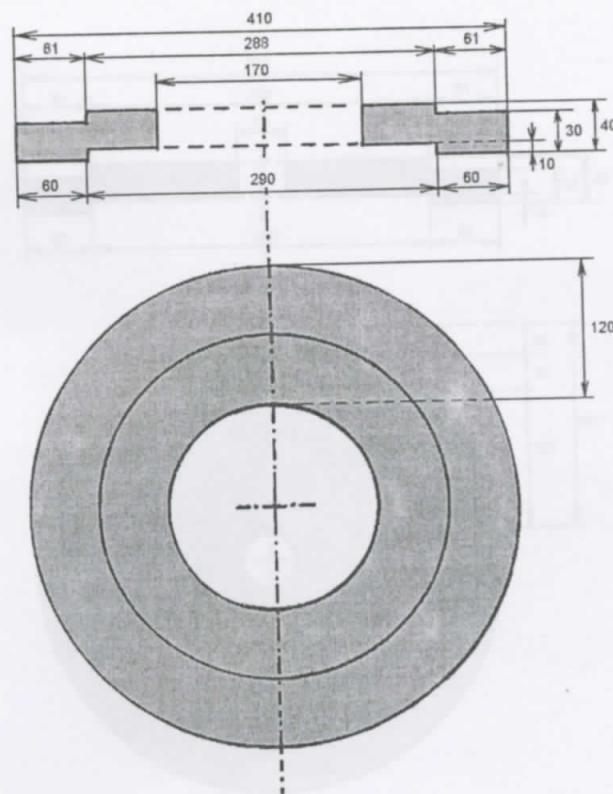
Sl. 30. Deo " B " Pb zaštite



**KOM. 1 ,  $m_C=42.5 \text{ kg}$**

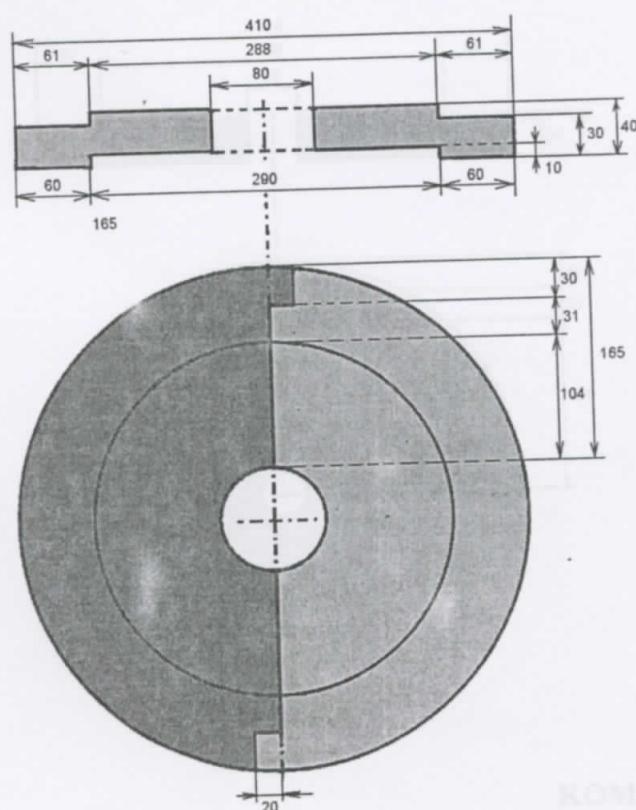
Sl. 31. Deo " C " Pb zaštite

Sl. 31.b. Deo " E " Pb zidanje . Kao što je početno, ovaj deo se sastoji od dva polukružna segmenta (  $m(1/2)_E=21.7 \text{ kg}.$  )



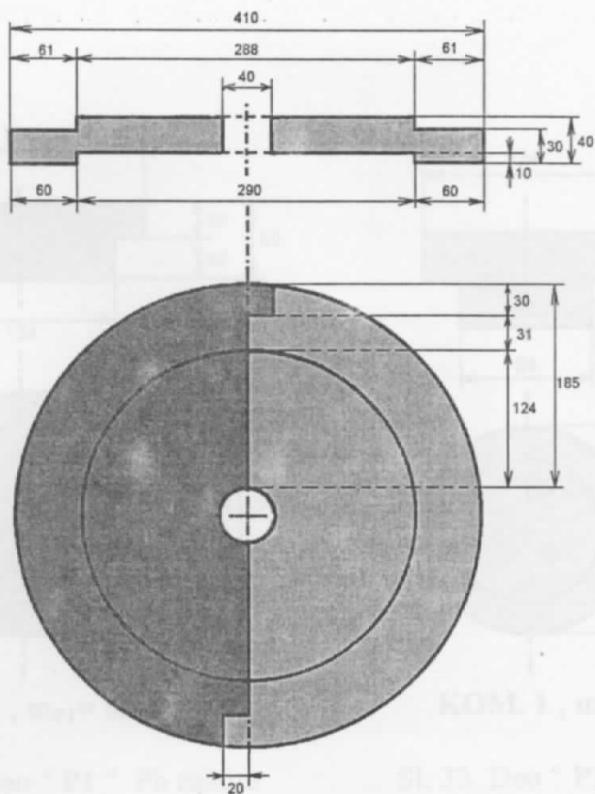
**KOM. 10 ,  $m_D=37.4 \text{ kg}$**

Sl. 31.a. Deo " D " Pb zaštite



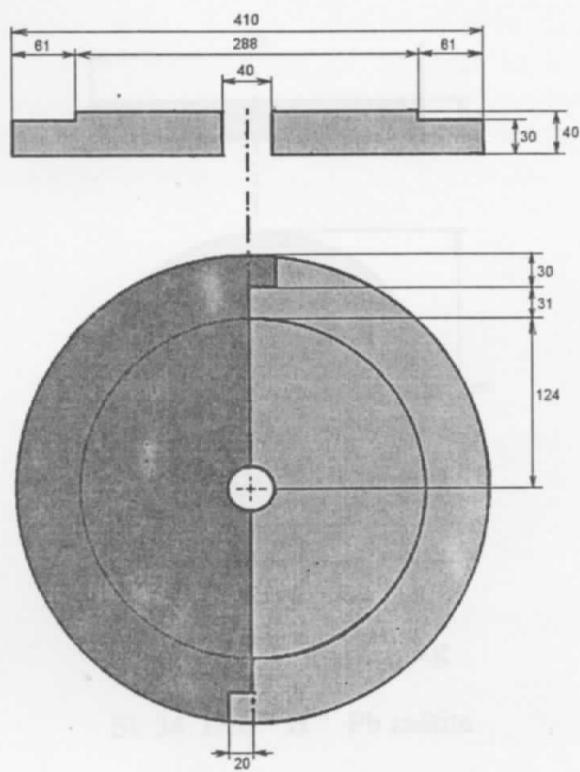
**KOM. 2 ,  $m_E=43.4 \text{ kg}$**

Sl. 31.b. Deo " E " Pb zaštite . Kao što je prikazano, ovaj deo se sastoji od dva polukružna segmenta (  $m(1/2)_E = 21.7 \text{ kg}$  ).



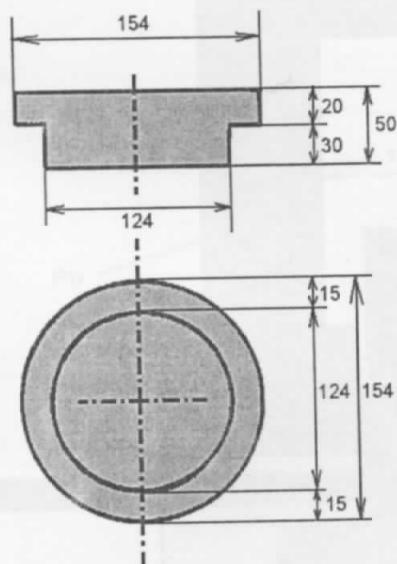
**KOM. 1 ,  $m_F = 44.72 \text{ kg}$**

Sl. 31.c. Deo " F " Pb zaštite( dva polukružna segmenta:  $m(1/2)_F = 22.36 \text{ kg}$  )



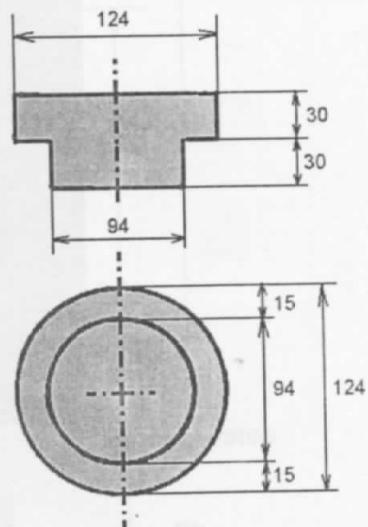
**KOM. 1 ,  $m_G = 52.0 \text{ kg}$**

Sl. 31.d. Deo " G " Pb zaštite( dva polukružna segmenta:  $m(1/2)_G = 26.0 \text{ kg}$  )



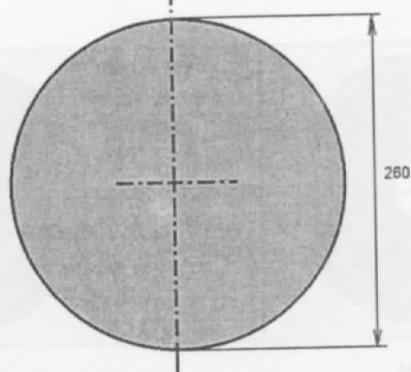
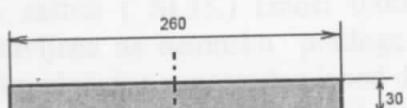
KOM. 1 ,  $m_{P1}= 8.4 \text{ kg}$

Sl. 32. Deo " P1 " Pb zaštite



KOM. 1 ,  $m_{P2}= 6.5 \text{ kg}$

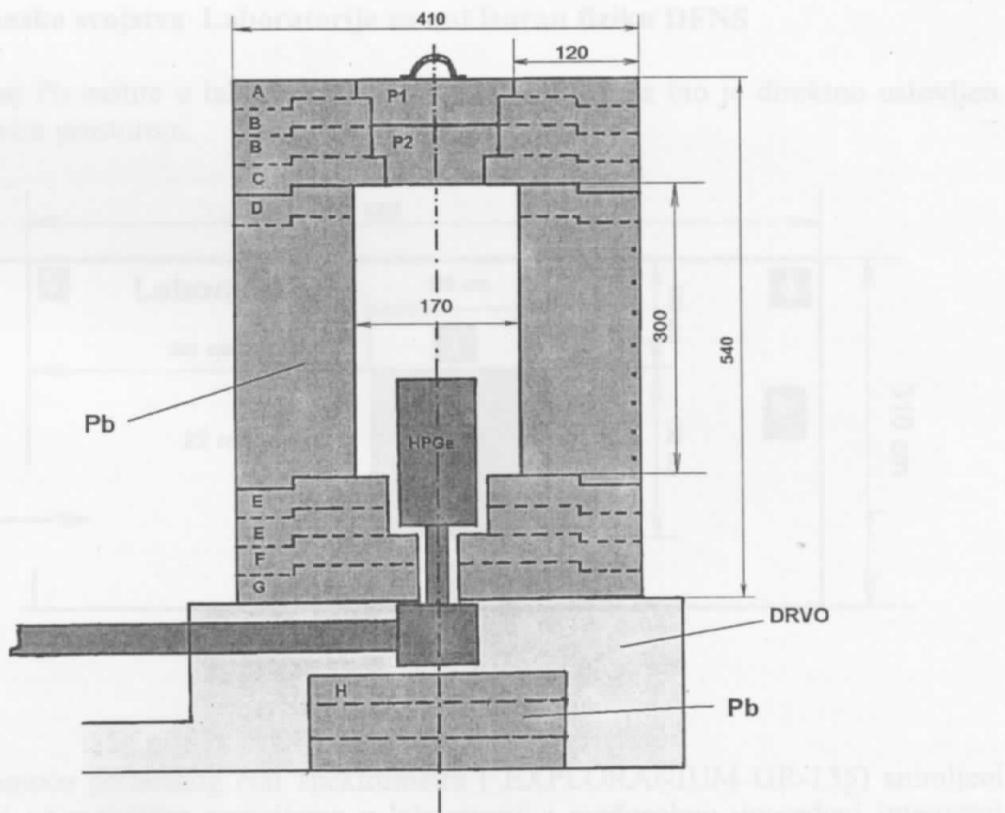
Sl. 33. Deo " P2 " Pb zaštite



KOM. 3 ,  $m_H= 18.1 \text{ kg}$

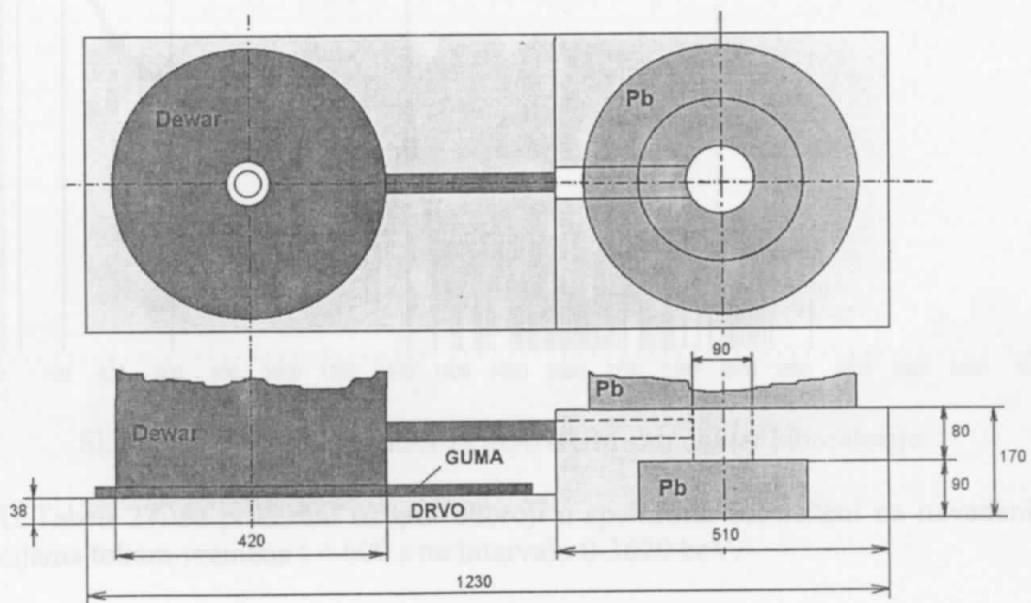
Sl. 34. Deo " H " Pb zaštite

Sl. 35. Shema postavljanja Dewar-ovog nala u odnosu na Pb zaštiti



S1.35. Shematski prikaz Pb zastite za GMX HPGe detektor sa HJ kriostatskom konfiguracijom u Laboratoriji za nuklearnu fiziku DFNS

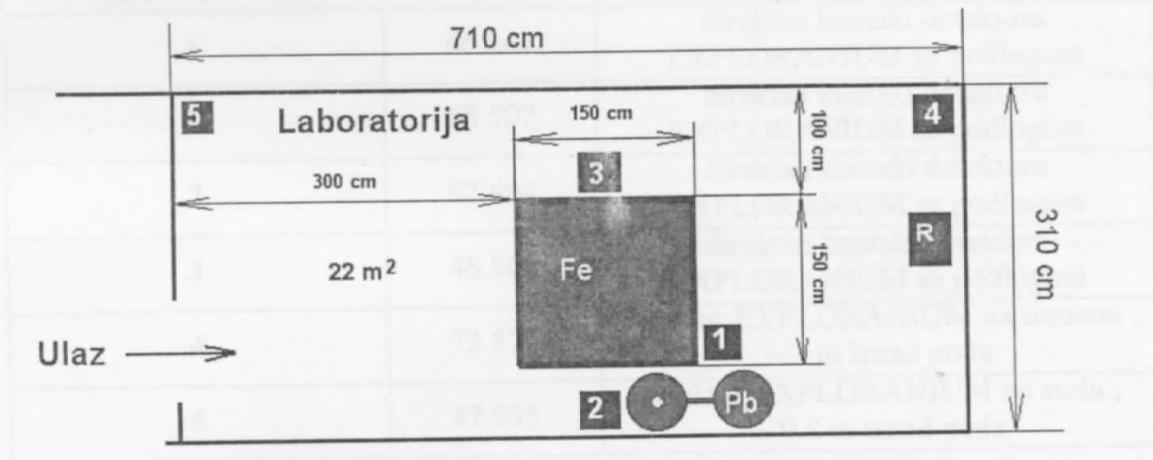
Korisna zapremina zaštite ( S1.35.) iznosi  $0.0068 \text{ m}^3$ , a debljina zidova 12 cm [22]. Zaštita je postavljena na betonsku podlogu na kojoj se nalazi drvena osnova sa ugrađenim olovnim pločama neposredno ispod detektora zbog redukovanja zračenja podloge. Djuarov sud se nalazi izvan zaštite, i to na sloju penaste gume radi smanjenja vibracija podloge ( S1.36.).



S1.36. Shema postavke Dewar-ovog suda u odnosu na Pb zaštitu

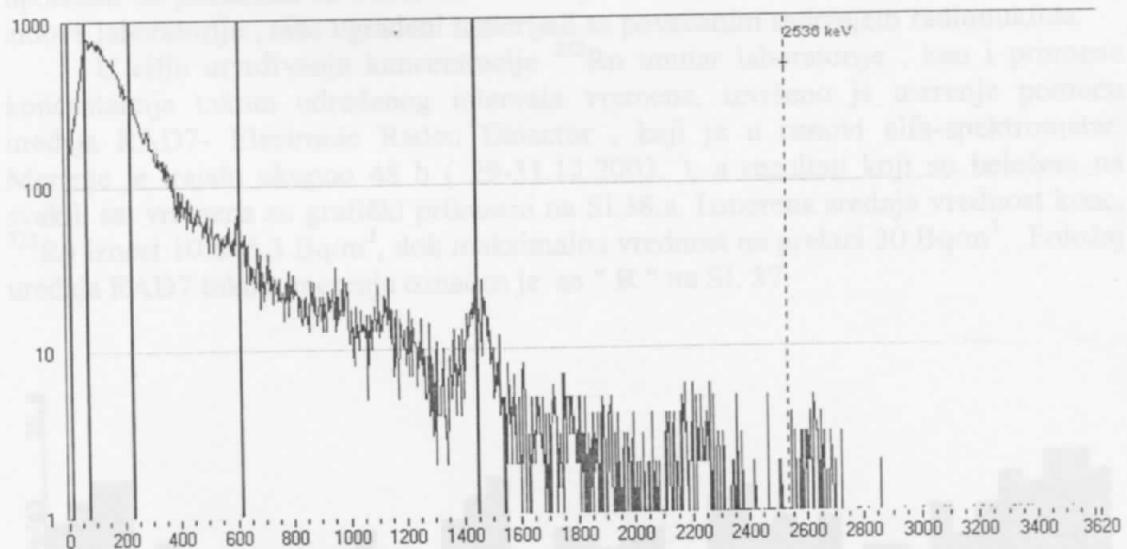
### 5.3 Fonska svojstva Laboratorije za nuklearnu fiziku DFNS

Položaj Pb zaštite u laboratoriji vidljiv je na Sl. 37., a bio je direktno uslovljen raspoloživim prostorom.



Sl.37. Skica laboratorije

Pomoću prenosnog NaI spektrometra ( EXPLORANIUM GR-135) snimljeni su spektri na različitim pozicijama u laboratoriji i međusobno upoređeni integralni odbroji da bi se videlo kako oni odražavaju distribuciju radionuklida unutar prostorije. Pozicije ( 1-5 ) na kojima su snimljeni spektri ucrtane su na Sl.37, dok je izgled tipičnog spektra vidljiv na Sl.38.



Sl.38. Spektar snimljen EXPLORANIUM-om unutar laboratorije

U Tabeli 27. su prikazani ukupni odbroji u spektrima zabeleženi na navedenim pozicijama tokom vremena t = 600 s na intervalu 0-3620 keV.

Tabela 27. Integralni odbroji u spektrima snimljenim u laboratoriji

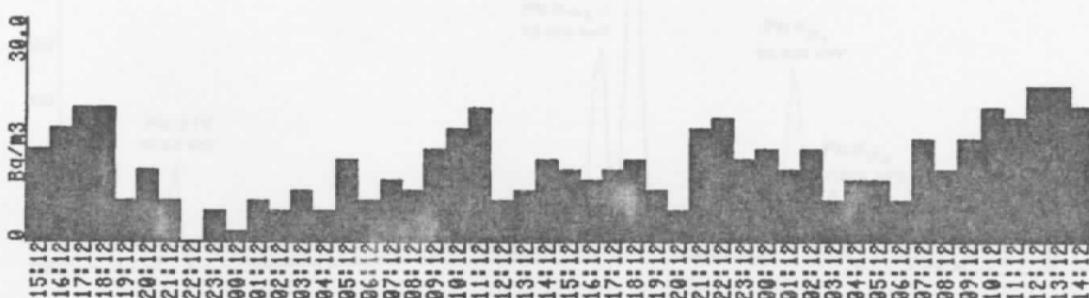
POZICIJA U LAB.	ODBROJ	NAPOMENA
1	65 241	direktan kontakt detektora EXPLORANIUM sa podlogom
1	65 507	direktan kontakt detektora EXPLORANIUM sa podlogom
2	62 494	direktan kontakt detektora EXPLORANIUM sa podlogom
3	48 806	direktan kontakt detektora EXPLORANIUM sa podlogom
4	72 575	detektor EXPLORANIUM na ormanu ; ~ 2 m iznad poda
5	47 995	detektor EXPLORANIUM na stolu ; ~ 0.8 m iznad poda

Na poziciji 1 , spektar je snimljen 2 puta radi provere reproducibilnosti merenja. Odbroj na pozicijama 1 i 2 u blizini Pb zaštite je veći za oko 30 % nego na poziciji 3.

Pošto je efikasnost detekcije HPGe detektora, model HJ , iz pravca podloge veoma mala i budući da je ispod detektora postavljen sloj Pb debljine 9 cm, razlika u fonskom odbroju HPGe detektora unutar zaštite na poziciji na kojoj se nalazi ( Sl.37 ) i na poziciji 3 bila bi zanemariva.

Merenjem integralnog odbroja na jednoj poziciji u dvorištu DFNS u direktnom kontaktu detektora sa zemljištem dobijena je vrednost 71 704 cts. Ovaj podatak upoređen sa podacima iz Tabele 27. ukazuje na činjenicu da u podlogu , odnosno zidove laboratorije , nisu ugrađeni materijali sa povećanim sadržajem radionuklida.

U cilju utvrđivanja koncentracije  $^{222}\text{Rn}$  unutar laboratorije , kao i promene koncentracije tokom određenog intervala vremena, izvršeno je merenje pomoću uređaja RAD7- Electronic Radon Detector , koji je u osnovi alfa-spektrometar. Merenje je trajalo ukupno 48 h ( 29-31.12.2003. ), a rezultati koji su beleženi na svakih sat vremena su grafički prikazani na Sl.38.a. Izmerena srednja vrednost konc.  $^{222}\text{Rn}$  iznosi  $10.6 \pm 5.3 \text{ Bq/m}^3$ , dok maksimalna vrednost ne prelazi  $30 \text{ Bq/m}^3$ . Položaj uređaja RAD7 tokom merenja označen je sa " R " na Sl. 37.

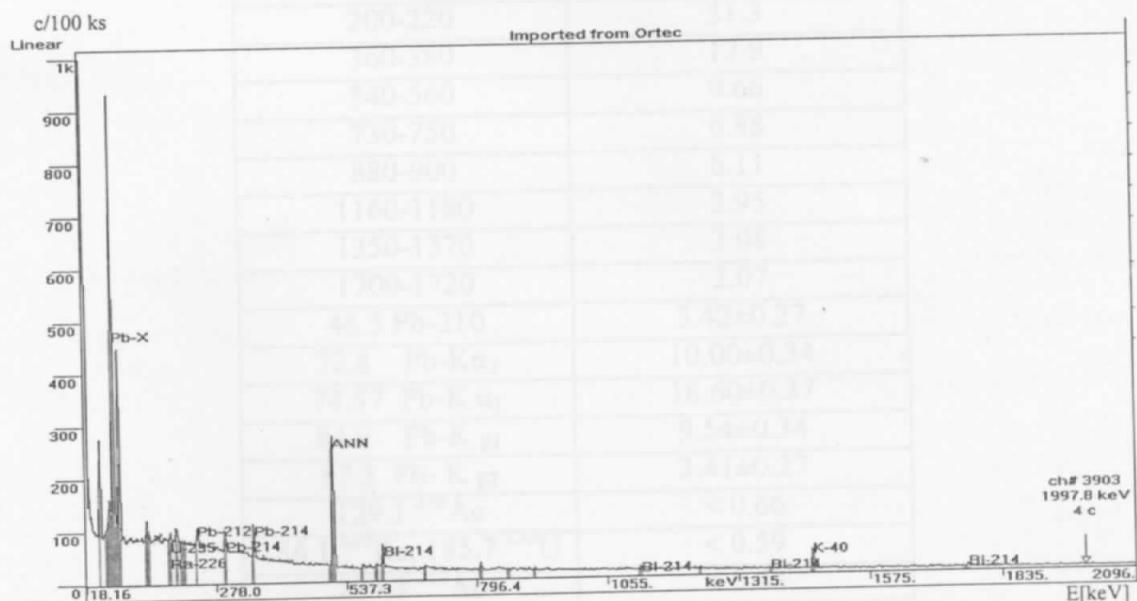


Sl.38.a. Vrednosti koncentracije  $^{222}\text{Rn}$  u Lab. za nuk. fiz. DFNS

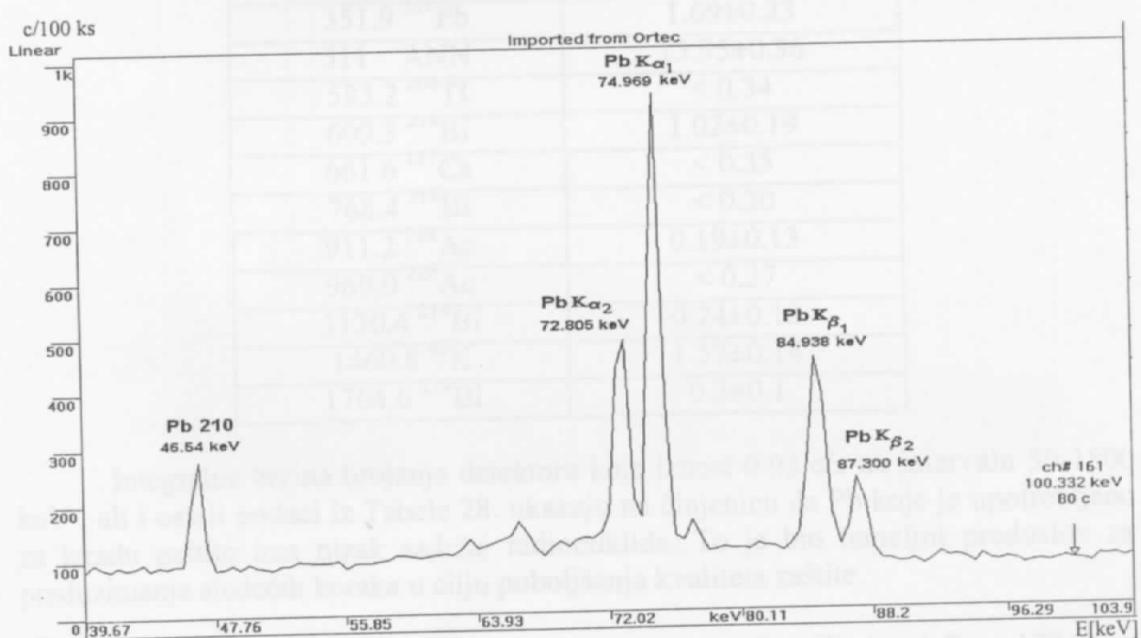
Rezultati merenja pokazuju da je konc.  $^{222}\text{Rn}$  u laboratoriji niska, ali i da se na osnovu 48-satnog merenja ne uočava periodičnost u varijacijama koncentracije.

#### 6. Karakteristike fonskih spektara konstruisane Pb zaštite u DFNS

Provera kvaliteta izrađene cilindrične Pb zaštite sa zidom debljine 12 cm, započeta je snimanjem fonskog spektra pomoću HPGe detektora rel.efikasnosti 32.4 % (model LLB-GMX-HJ). Spektar je snimljen tokom vremena  $t_{liv} = 568\ 272$  s, a predstavljen je na Sl. 39., dok je niskoenergetski deo spektra vidljiv na Sl.40 i njime dominiraju X fluoroscentne linije Pb, koje su ujedno i najintenzivnije linije u celokupnom spektru.



S1 39. Eferski spektar snimljen HPGe detektorom unutar Pb zaštite



S1.40. Niskoenergetski deo spektra ( 40 keV-100 keV )

Odbroji po jedinici vremena za pojedine energijske intervale , kao i za fonske gama linije, dati su u Tabeli br.28.

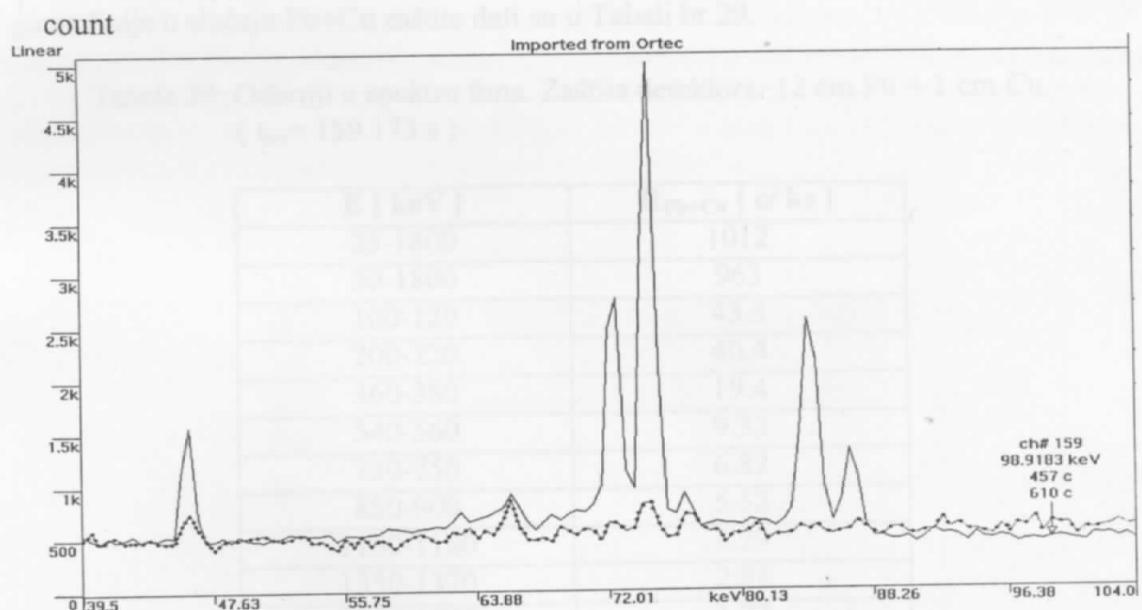
Tabela 28. Odbroji u spektru fona. Zaštita detektora: 12 cm Pb.  
(  $t_{liv}= 568\ 272\ s$  )

E [ keV ]	R <sub>Pb</sub> [ c/ ks ]
25-1800	977
50-1800	930
100-120	33.1
200-220	31.3
360-380	17.9
540-560	9.66
730-750	6.88
880-900	6.11
1160-1180	3.95
1350-1370	3.08
1700-1720	2.07
46.5 Pb-210	3.42±0.27
72.8 Pb-K <sub>a2</sub>	10.00±0.34
74.97 Pb-K $\alpha_1$	16.60±0.37
84.9 Pb-K $\beta_1$	9.54±0.34
87.3 Pb- K $\beta_2$	3.41±0.27
129.1 <sup>228</sup> Ac	< 0.66
186.1 <sup>226</sup> Ra, 185.7 <sup>235</sup> U	< 0.59
209.3 <sup>228</sup> Ac	< 0.48
238.6 <sup>212</sup> Pb	0.54±0.22
295.2 <sup>214</sup> Pb	0.82±0.26
351.9 <sup>214</sup> Pb	1.69±0.23
511 ANN	13.95±0.36
583.2 <sup>208</sup> Tl	< 0.34
609.3 <sup>214</sup> Bi	1.02±0.19
661.6 <sup>137</sup> Cs	< 0.35
768.4 <sup>214</sup> Bi	< 0.30
911.2 <sup>228</sup> Ac	0.19±0.13
969.0 <sup>228</sup> Ac	< 0.27
1120.4 <sup>214</sup> Bi	0.24±0.12
1460.8 <sup>40</sup> K	1.57±0.14
1764.6 <sup>214</sup> Bi	0.3±0.1

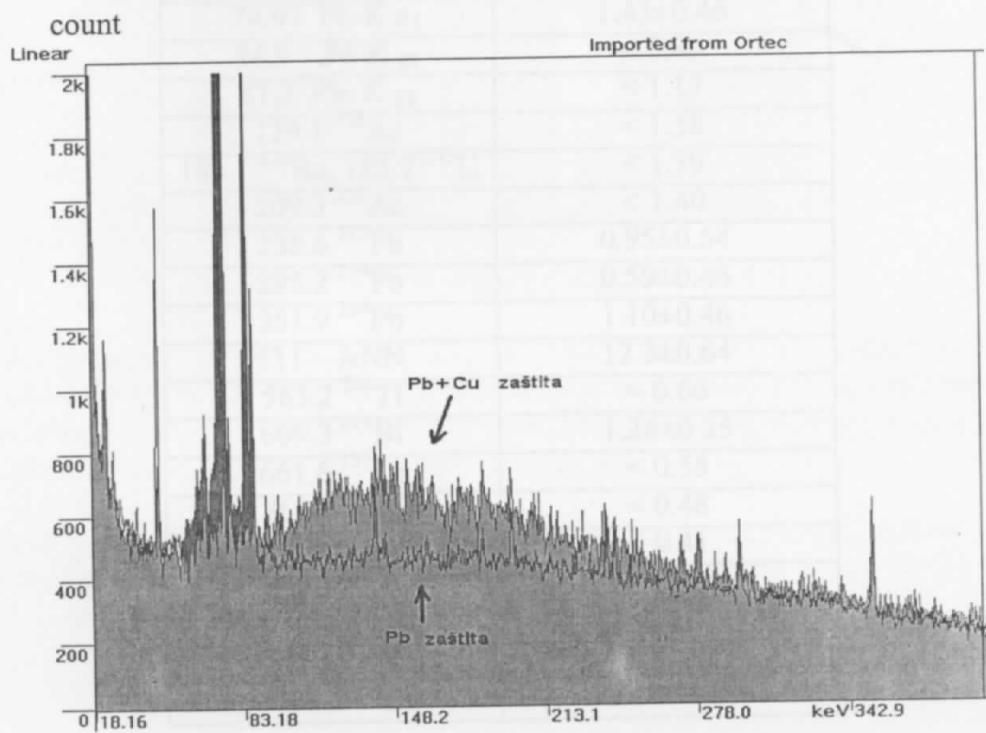
Integralna brzina brojanja detektora koja iznosi 0.93 c/s na intervalu 50-1800 keV , ali i ostali podaci iz Tabele 28. ukazuju na činjenicu da Pb koje je upotrebljeno za izradu zaštite ima nizak sadržaj radionuklida. To je bio temeljni preduslov za preduzimanje sledećih koraka u cilju poboljšanja kvaliteta zaštite.

Da bi se eliminisale Pb-X linije , izrađen je Cu cilindar (  $D_{out}=170\ mm$ ,  $H=280\ mm$ ) sa zidom debljine 1 cm, i postavljen kao unutrašnji sloj Pb zaštite. Šuplji Cu disk debljine 1 cm prethodno je postavljen na dno efektivne zapremine Pb

štita. Takav disk postavljen je i sa gornje strane cilindra. Ovo je za posledicu imalo evidentne promene na spektru ( Sl.41. i Sl.42).



Sl.41. Redukcija Pb-X linija primenom sloja Cu debljine 1 cm unutar Pb štita



Sl.42. Izrazito povećanje intenziteta kontinuuma zbog postavljanja unutrašnjeg zaštitnog sloja Cu

Očigledno je da su Pb-X linije redukovane, zahvaljujući prisustvu Cu kao unutrašnjeg zaštitnog sloja, međutim, intenzitet kontinuuma spektra ispod 511 keV

( 50-500 keV ) je porastao sa 602 c/ks ,na 659 c/ks što je posebno izraženo na intervalu 90-290 keV ( 303 c/ks → 396 c/ks ), Sl.42.

Odbroji po jedinici vremena za pojedine energijske intervale , kao i za fonske gama linije u slučaju Pb+Cu zaštite dati su u Tabeli br.29.

Tabela 29. Odbroji u spektru fona. Zaštita detektora: 12 cm Pb + 1 cm Cu.  
(  $t_{liv} = 159\ 173\ s$  )

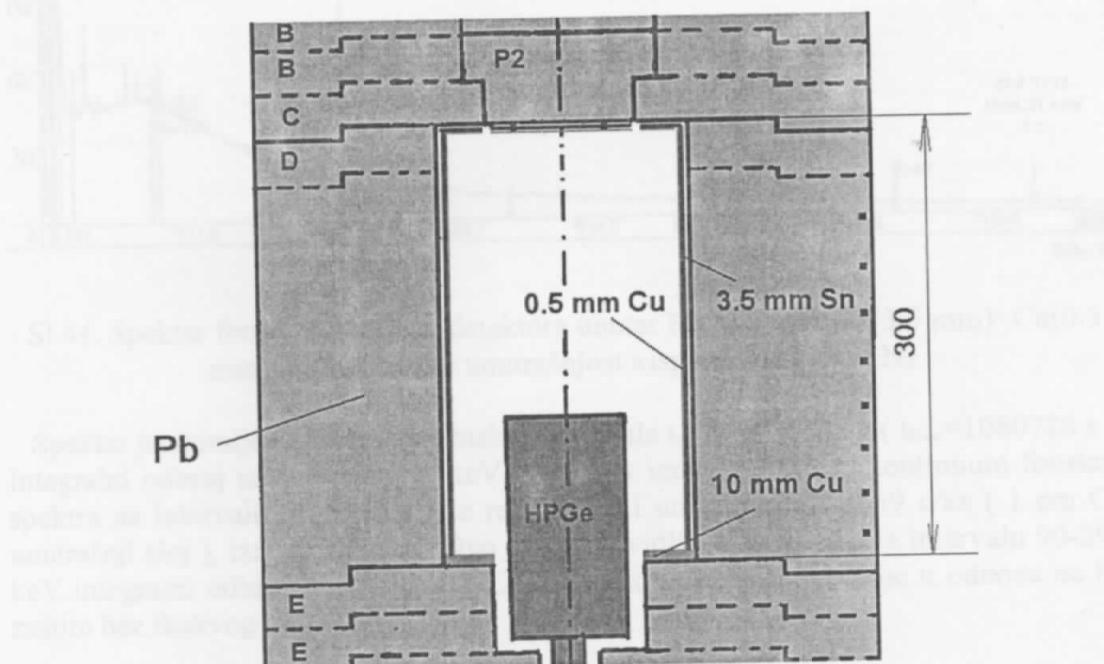
$E$ [ keV ]	$R_{Pb+Cu}$ [ c/ ks ]
25-1800	1012
50-1800	963
100-120	43.3
200-220	40.4
360-380	19.4
540-560	9.33
730-750	6.82
880-900	5.52
1160-1180	3.79
1350-1370	2.88
1700-1720	1.77
46.5 Pb-210	$0.68 \pm 0.47$
72.8 Pb-K $\alpha_2$	< 0.83
74.97 Pb-K $\alpha_1$	$1.43 \pm 0.46$
84.9 Pb-K $\beta_1$	< 0.89
87.3 Pb- K $\beta_2$	< 1.17
129.1 $^{228}\text{Ac}$	< 1.58
186.1 $^{226}\text{Ra}$ , 185.7 $^{235}\text{U}$	< 1.39
209.3 $^{228}\text{Ac}$	< 1.40
238.6 $^{212}\text{Pb}$	$0.95 \pm 0.54$
295.2 $^{214}\text{Pb}$	$0.59 \pm 0.46$
351.9 $^{214}\text{Pb}$	$1.10 \pm 0.46$
511 ANN	$12.3 \pm 0.64$
583.2 $^{208}\text{Tl}$	< 0.66
609.3 $^{214}\text{Bi}$	$1.26 \pm 0.35$
661.6 $^{137}\text{Cs}$	< 0.55
768.4 $^{214}\text{Bi}$	< 0.48
911.2 $^{228}\text{Ac}$	< 0.41
969.0 $^{228}\text{Ac}$	< 0.44
1120.4 $^{214}\text{Bi}$	< 0.35
1460.8 $^{40}\text{K}$	$1.11 \pm 0.22$
1764.6 $^{214}\text{Bi}$	$0.17 \pm 0.11$

U spektru su registrovane linije od 669.6 keV (  $0.25 \pm 0.20$  c/ks ) i 962.1 keV (  $0.41 \pm 0.25$  c/ks ) uzrokovane neutronima u reakciji  $^{63}\text{Cu}(n,n')$   $^{63}\text{Cu}$ .

U cilju rešavanja problema visokog spektralnog kontinuma uzrokovanog upotrebot relativno debelog ( 1 cm ) unutrašnjeg sloja Cu , primenjena je Monte Karlo simulacija[22]. Iz rezultata proračuna, tj. analiza različitih materijala, dobijeno je optimalno rešenje : upotreba Sn debljine 3.5 mm dovodi do redukcije Pb-X linija ( > 99.5 % ), a da pri tome kontinuum niskoenergetskog dela spektra ne raste. Budući

da Sn ima X fluorescentno zračenje sa energijama ispod 30 keV ( $K_{\alpha 1}=25.27$  keV,  $K_{\beta 1}=28.49$  keV), ono se efikasno otklanja tankim slojem Cu debljine 0.5 mm.

Upravo ovakav ( Sn+Cu ) unutrašnji sloj Pb zaštite je realizovan- načinjen je cilindar spoljnog prečnika 165 mm i visine 285 mm . Za njegovu izradu iskorišten je Sn čistoće 99.99 %. Umesto ranijeg Cu cilindra , unutar Pb zaštite je postavljen Sn+Cu cilindar ( zid: 3.5 mm Sn+0.5 mm Cu ) sa šupljim diskom Sn+Cu sa gornje strane. Takođe, na čep Pb zaštite postavljen je Sn+Cu disk ( Sl.43.). Na ovaj način je kompletirana izrada unutrašnjeg zaštitnog sloja Pb zaštite.

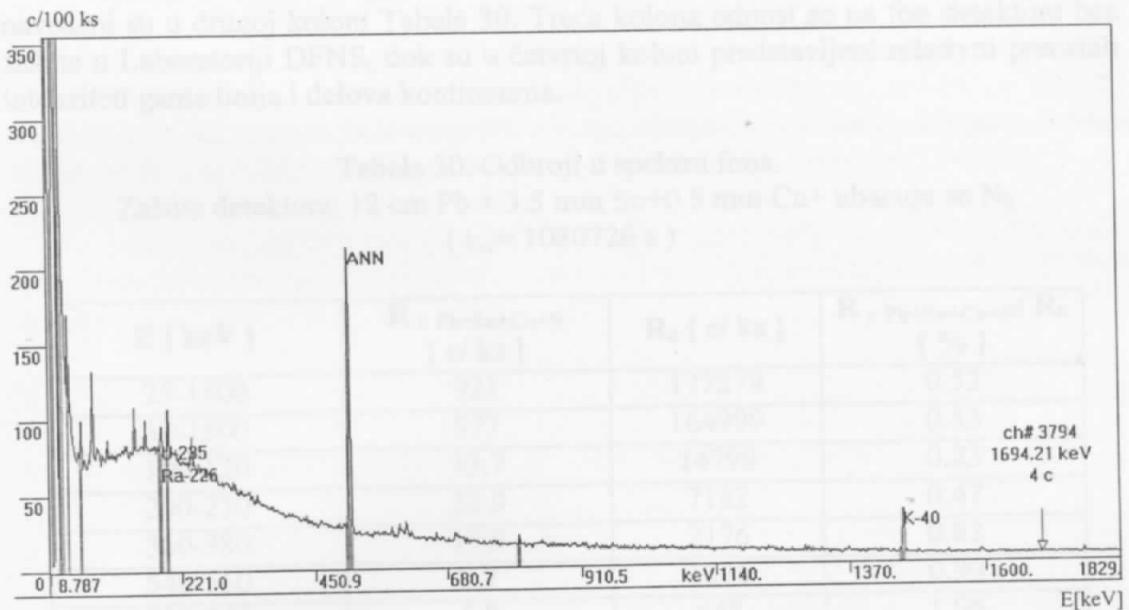


Sl. 43. Unutrašnjost Pb zaštite, obložena Sn+Cu slojem

Iako je zapremina Pb zaštite mala, iz Tabele 28. i 29. je vidljivo prisustvo postradonskih linija. Da bi se one redukovale, nakon primene novog zaštitnog sloja ( Sn+Cu ), gasoviti  $N_2$  iz DEWAR-ovog suda, kontinuirano se ubacuje putem cevi u unutrašnjost zaštite , čime se postiže "istiskivanje" Rn.

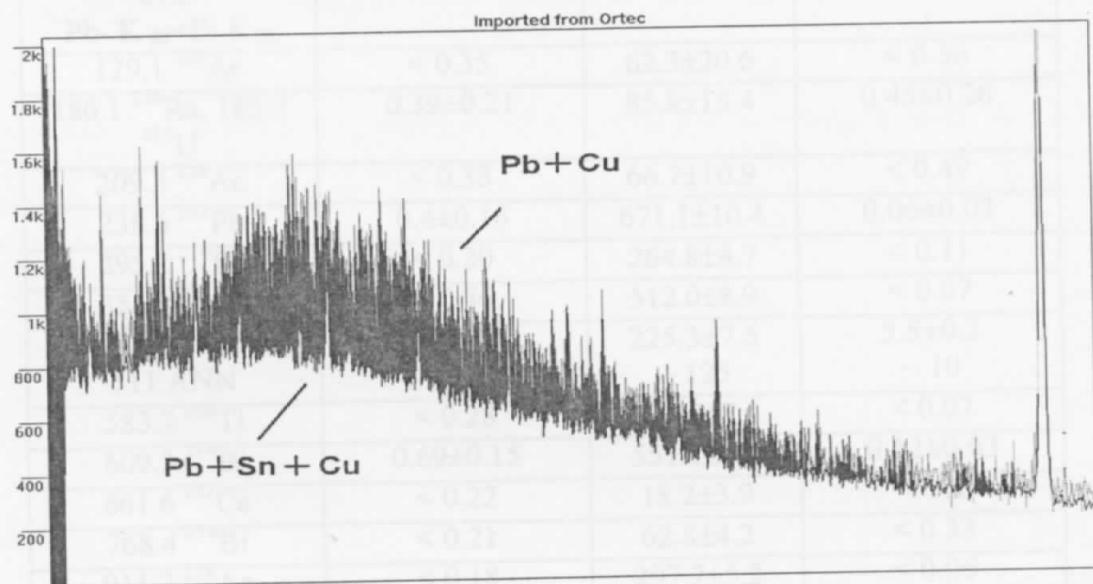
Spektar koji je dobijen kao rezultat ovih operacija na doradi zaštite ( novi unutrašnji zašt. sloj + potiskivanje postrad. linija pomoću  $N_2$  ) za HPGe GMX detektor, prikazan je na Sl. 44.

Sl. 44. Rezultat novootkrivenog spektrologičnog kodiranja ispod 51.1 keV.  
Gornji spektar: 12 cm Pb+1 cm Cu+0.5 mm Cu zaštitni sloj  
Donji spektar: 12 cm Pb+1.5 mm Sn+0.5 mm Cu zaštitni sloj  
Izvor: J. S. Hwang et al., Nucl. Inst. and Methods in Phys. Res. A 392 (1997) 333-336



S1.44. Spektar fona GMX HPGe detektora unutar Pb ( 12 cm)+Sn(3.5 mm)+Cu(0.5 mm) zaštite, čija se unutrašnjost «ispira» gasovitim N<sub>2</sub>

Spektar je snimljen tokom vremenskog intervala  $t_{\text{real}} = 1080842$  s (  $t_{\text{live}} = 1080726$  s ). Integralni odbroj na intervalu 50 keV-1800 kev iznosi 0.88 c/s. Kontinuum fonskog spektra na intervalu 50-500 keV je redukovani i umesto ranijih 659 c/ks ( 1 cm Cu unutrašnji sloj ), iznosi 568 c/ks. Ovo je jasno vidljivo na S1.45. Na intervalu 90-290 keV integralni odbroj ima vrednost 324 c/ks, što je blago povećanje u odnosu na Pb zaštitu bez ikakvog unutrašnjeg sloja.



S1.45. Razlika u intenzitetima spektralnog kontinuituma ispod 511 keV .  
Gornji spektar: 12 cm Pb+ 1cm Cu zaštita.  
Donji spektar : 12 cm Pb+ 3.5 mm Sn+0.5 mm Cu zaštita(+ osvežavanje sa N<sub>2</sub>)

Intenziteti fonskih linija i delova kontinuma u slučaju Pb+Sn+Cu(+N<sub>2</sub>) zaštite navedeni su u drugoj koloni Tabele 30. Treća kolona odnosi se na fon detektora bez zaštite u Laboratoriji DFNS, dok su u četvrtoj koloni predstavljeni relativni preostali intenziteti gama linija i delova kontinuma.

Tabela 30. Odbroji u spektru fona.

Zaštitu detektora: 12 cm Pb + 3.5 mm Sn+0.5 mm Cu+ ubacuje se N<sub>2</sub>  
 ( t<sub>liv</sub>= 1080726 s )

E [ keV ]	R <sub>ε</sub> Pb+Sn+Cu+N [ c/ ks ]	R <sub>0</sub> [ c/ ks ]	R <sub>ε</sub> Pb+Sn+Cu+N / R <sub>0</sub> [ % ]
25-1800	921	177279	0.52
50-1800	877	164999	0.53
100-120	33.7	14799	0.23
200-220	33.9	7182	0.47
360-380	17.9	2176	0.82
540-560	9.7	1076	0.90
730-750	6.9	648	1.06
880-900	5.67	503	1.13
1160-1180	3.95	401	0.98
1350-1370	2.95	187	1.58
1700-1720	1.88	61	3.08
46.5 Pb-210	0.89±0.20	< 22.2	> 3.4
72.8 Pb-K <sub>α2</sub>	< 0.37	25.7±15	< 1.4
74.97 Pb-K <sub>α1</sub> +Bi K <sub>α2</sub>	< 0.30	114.8±15.9	< 0.26
84.9 Pb-K <sub>β1</sub>	< 0.34	36±14	< 0.94
87.3 Pb-K <sub>β2</sub> +Bi K <sub>β1</sub>	< 0.32	60±17	< 0.53
129.1 <sup>228</sup> Ac	< 0.35	62.3±20.6	< 0.56
186.1 <sup>226</sup> Ra, 185.7 <sup>235</sup> U	0.39±0.21	85.8±15.4	0.45±0.26
209.3 <sup>228</sup> Ac	< 0.33	66.7±10.9	< 0.49
238.6 <sup>212</sup> Pb	0.4±0.16	671.1±10.4	0.06±0.02
295.2 <sup>214</sup> Pb	< 0.30	264.8±8.7	< 0.11
351.9 <sup>214</sup> Pb	< 0.36	512.0±8.9	< 0.07
511 ANN(+ <sup>208</sup> Tl)	12.4±0.26	225.3±7.5	5.5±0.2
511 ANN	~ 12	~ 125	~ 10
583.2 <sup>208</sup> Tl	< 0.28	373.5±7.5	< 0.07
609.3 <sup>214</sup> Bi	0.69±0.15	551.1±6.4	0.12±0.03
661.6 <sup>137</sup> Cs	< 0.22	18.2±3.9	< 1.2
768.4 <sup>214</sup> Bi	< 0.21	62.8±4.2	< 0.33
911.2 <sup>228</sup> Ac	< 0.18	297.7±5.2	< 0.06
969.0 <sup>228</sup> Ac	< 0.13	179.7±4.7	< 0.07
1120.4 <sup>214</sup> Bi	< 0.15	161.2±4.3	< 0.09
1460.8 <sup>40</sup> K	1.36±0.10	1480.9±8.1	0.092±0.007
1764.6 <sup>214</sup> Bi	0.15±0.06	153.6±2.9	0.09±0.04

Kao što se može primetiti, potiskivanje Rn iz unutrašnjosti zaštite primenom N<sub>2</sub>, dovelo je do gotovo potpunog otklanjanja postradonskih linija. Ukupan fonski odbroj detektora na intervalu 25-1800 keV redukovana je oko 190 puta ( 1/0.0052 ).

U fonskom spektru prikazanom na Sl.44. registrovane su linije uzrokovane reakcijama neutrona sa materijalom detektora ( Ge) i materijalom zaštite (Pb), a navedene su u Tabeli 31.

Tabela 31. Gama linije uzrokovane neutronima

E <sub>γ</sub> [keV]	Reakcija	I [ c/ks jeff.]
23.4	<sup>70</sup> Ge(n,γ) <sup>71m</sup> Ge	0.036 ± 0.006
66.7	<sup>72</sup> Ge(n,γ) <sup>73m</sup> Ge	0.048 ± 0.006
139.7	<sup>74</sup> Ge(n,γ) <sup>75m</sup> Ge	0.013 ± 0.006
159.5	<sup>76</sup> Ge(n,γ) <sup>77m</sup> Ge	0.013 ± 0.007
198.9	<sup>70</sup> Ge(n,γ) <sup>71m</sup> Ge	0.017 ± 0.007
595.9	<sup>74</sup> Ge(n,n) <sup>74*</sup> Ge	0.015 ± 0.004
691.3	<sup>72</sup> Ge(n,n) <sup>72*</sup> Ge	0.007 ± 0.003
834	<sup>72</sup> Ge(n,n) <sup>72*</sup> Ge	< 0.005
569.7	Pb 207 ( n, n ) Pb <sup>*</sup> 207	< 0.007
803.1	Pb 206 ( n, n ) Pb <sup>*</sup> 206	0.009 ± 0.003
1063.6	Pb 207 ( n, n ) Pb <sup>*</sup> 207	< 0.004

Uporedni prikaz karakteristika fonskih spektara Pb zaštite bez unutrašnjeg zašt. sloja, kao i uz primenu Cu, odnosno Sn+Cu(+N<sub>2</sub>) kao unutrašnjeg sloja, dat je u Tabeli 32. Četvrta kolona je istaknuta zbog toga što ona predstavlja svojstva aktuelne zaštite u Laboratoriji za nuklearnu fiziku na Departmanu za fiziku u Novom Sadu. U petoj koloni su radi usporedbe navedeni odgovarajući podaci vezani za komercijalni štit niskofonskog sistema u Podgorici.

Tabela 32. Komparacija intenziteta delova kontinuma i gama linija u spektrima GMX HPGe detektora unutar zaštite realizovane na DFNS. Uporedni prikaz sa fonskim spektrom dobijenim primenom komercijalne zaštite laboratorije u Podgorici.

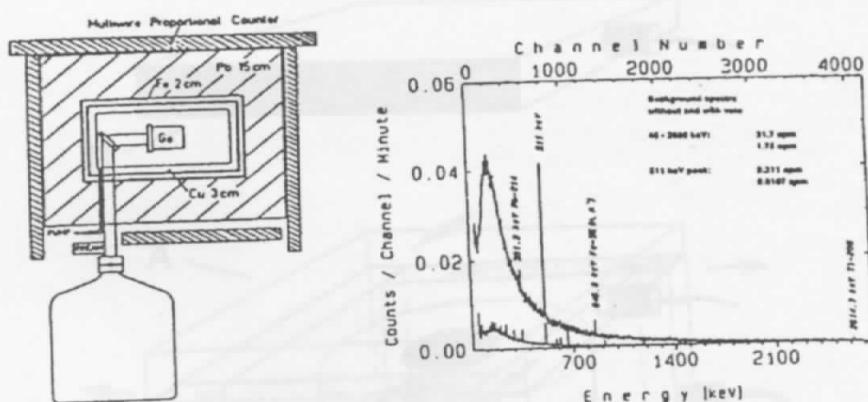
E [ keV ]	R <sub>ε Pb</sub> [ c/jeff ks ]	R <sub>ε Pb +Cu</sub> [ c/jeff ks ]	R <sub>ε</sub> Pb+Sn+Cu+N2 [ c/jeff ks ]	R <sub>ε Podgorica</sub> [ c/(ks jeff) ]
25-1800	30.1	31.2	<b>28.4</b>	
50-1800	28.7	29.7	<b>27.1</b>	27.4
100-120	1.02	1.34	<b>1.04</b>	1.0
200-220	0.97	1.25	<b>1.05</b>	1.03
360-380	0.55	0.60	<b>0.55</b>	0.55
540-560	0.30	0.29	<b>0.30</b>	0.33
730-750	0.21	0.21	<b>0.21</b>	0.21
880-900	0.19	0.17	<b>0.17</b>	0.17
1160-1180	0.12	0.12	<b>0.12</b>	0.13
1350-1370	0.095	0.089	<b>0.091</b>	0.092
1700-1720	0.064	0.055	<b>0.058</b>	0.062
46.5 Pb-210	0.105±0.008	0.021±0.014	<b>0.027±0.008</b>	< 0.023
72.8 Pb-K <sub>Kα<sub>2</sub></sub>	0.309±0.010	< 0.0256	<b>&lt; 0.011</b>	
74.97 Pb-K <sub>α<sub>1</sub></sub>	0.512 ±0.011	0.044±0.014	<b>&lt; 0.009</b>	< 0.020
84.9 Pb-K <sub>β<sub>1</sub></sub>	0.294 ±0.010	< 0.027	<b>&lt; 0.010</b>	
87.3 Pb-K <sub>β<sub>2</sub></sub>	0.105±0.008	< 0.036	<b>&lt; 0.010</b>	
129.1 <sup>228</sup> Ac	< 0.0204	< 0.049	<b>&lt; 0.011</b>	< 0.023
186.1 <sup>226</sup> Ra, 185.7 <sup>235</sup> U	< 0.0182	< 0.043	<b>0.012±0.006</b>	< 0.030
209.3 <sup>228</sup> Ac	< 0.0148	< 0.043	<b>&lt; 0.010</b>	< 0.022
238.6 <sup>212</sup> Pb	0.017±0.007	0.029±0.017	<b>0.012±0.005</b>	0.034±0.014
295.2 <sup>214</sup> Pb	0.025±0.008	0.018±0.014	<b>&lt; 0.009</b>	0.026±0.01
351.9 <sup>214</sup> Pb	0.052±0.007	0.034±0.014	<b>&lt; 0.011</b>	0.030±0.009
511 ANN	0.431±0.011	0.38±0.02	<b>0.38 ±0.01</b>	0.46±0.02
583.2 <sup>208</sup> Tl	< 0.0105	< 0.02	<b>&lt; 0.009</b>	< 0.0195
609.3 <sup>214</sup> Bi	0.031±0.006	0.039±0.011	<b>0.021±0.005</b>	0.027±0.007
661.6 <sup>137</sup> Cs	< 0.0108	< 0.017	<b>&lt; 0.007</b>	< 0.012
768.4 <sup>214</sup> Bi	< 0.0093	< 0.015	<b>&lt; 0.006</b>	< 0.011
911.2 <sup>228</sup> Ac	0.006±0.004	< 0.013	<b>&lt; 0.006</b>	< 0.013
969.0 <sup>228</sup> Ac	< 0.008	< 0.013	<b>&lt; 0.004</b>	< 0.011
1120.4 <sup>214</sup> Bi	0.007±0.004	< 0.011	<b>&lt; 0.005</b>	< 0.01
1460.8 <sup>40</sup> K	0.05±0.004	0.034±0.007	<b>0.042±0.003</b>	0.057±0.005
1764.6 <sup>214</sup> Bi	0.009±0.003	0.005±0.003	<b>0.005±0.002</b>	0.014±0.004

Sledeća faza poboljšanja svojstava pasivne zaštite, jeste uvođenje aktivnih komponenti zaštite koje bi redukovanjem doprinosa kosmičkog zračenja, dovele do dodatnog sniženja fonskog odbroja.

## 7. Aktivni štit za Pb zaštitu u Laboratoriji za nuklearnu fiziku DFNS

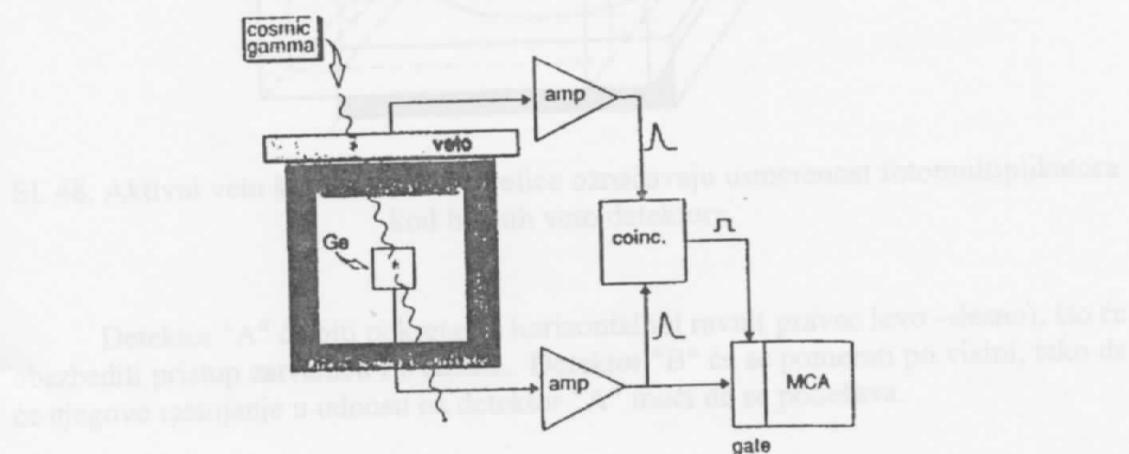
Za redukciju kosmičkog zračenja u niskofonskim sistemima koriste se spoljašnji zaštitni detektori velike površine, odnosno veto detektori.

Najbolje je da se zaštitni detektori postave sa svih strana pasivne zaštite ( sl. 46 ), ali su merenja pokazala da najveći doprinos smanjenju kosmičkog fona( oko 76% ukupnog smanjenja), daje veto detektor postavljen odozgo, tako da iz ekonomskih razloga zaštita može biti svedena na manji broj zaštitnih detektora. Shema antikoincidentne veze Ge detektora sa jednim veto detektorom prikazana je na Sl.47.



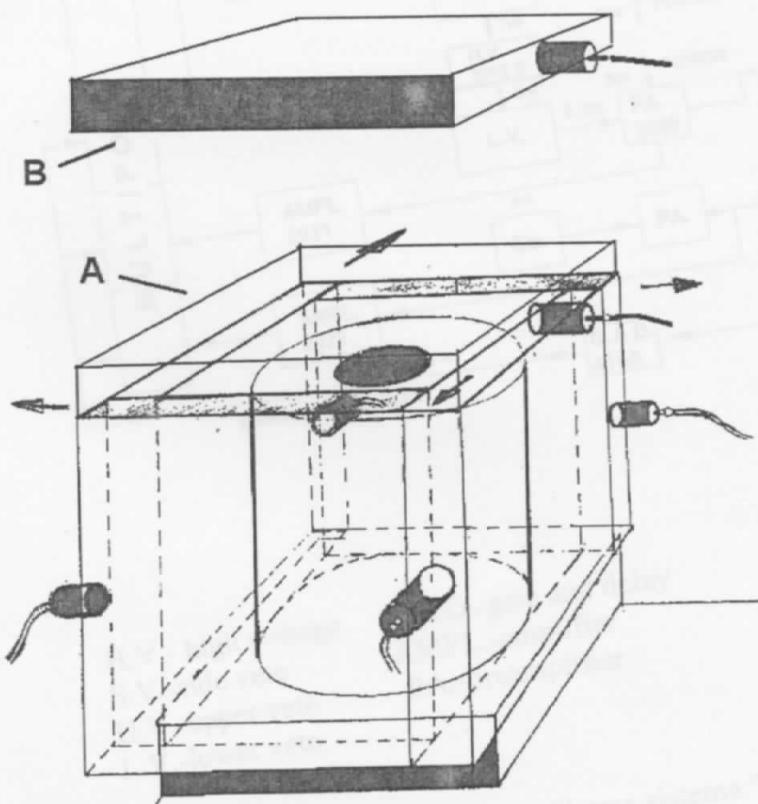
Sl.46. Niskofonski Ge spektrometar zaštićen sa 6 spoljašnjih veta detektora i spektar njegovog fona sa i bez veta signala. Laboratorija je pod pokrivnim slojem od 15 mwe ( Max-Planck ,Heidelberg , Germany ).

Primenom kvalitetne vete zaštite, moguće je integralni odbroj na intervalu 50-500 keV sniziti preko 10 puta[5].



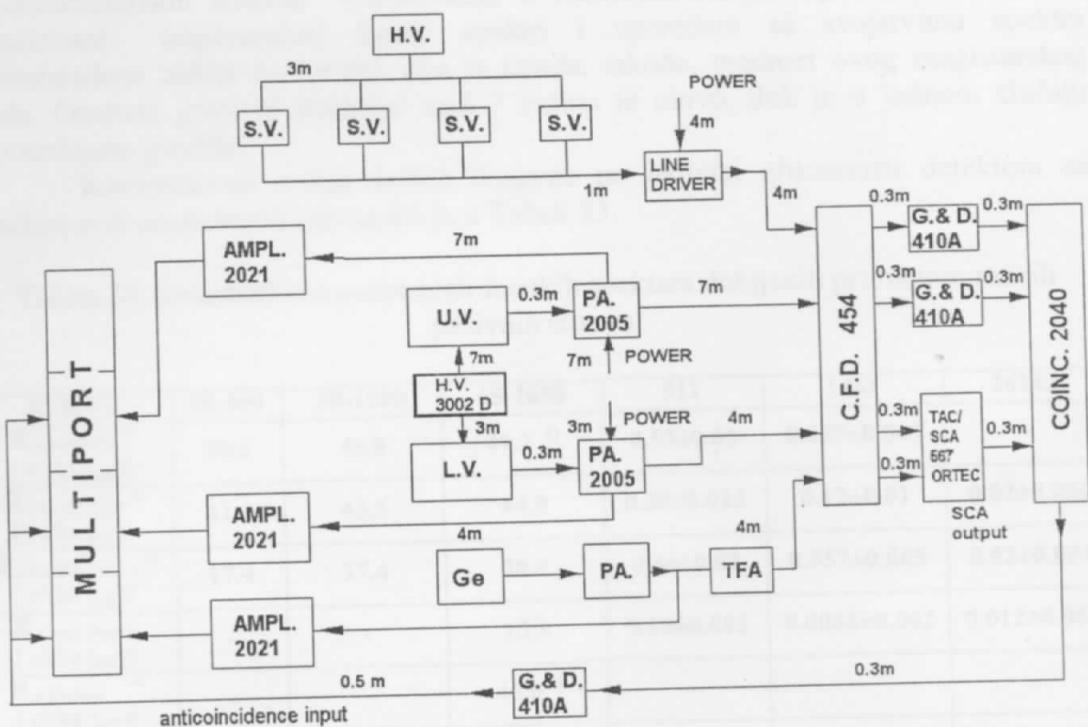
Sl. 47. Niskofonski Ge spektrometar sa jednim veta detektorom u antikoincidentnoj vezi.

Na DFNS će biti realizovana aktivna zaštita sa 6 veto detektora. U pitanju su plastični scintilatori, oblika ploče dimenzija  $0.5 \times 0.5 \times 0.05$  m, čija je masa 12.5 kg, sa po jednim ugrađenim fotomultiplikatorom. Dva scintilaciona detektora će se nalaziti iznad Pb zaštite, dok će preostala 4, bočno opkoljavati zaštitu (Sl.48). Kompletan shema komponenti koje će sačinjavati niskofonski sistem prikazana je na Sl.49. Osnovna namena takvog sistema će biti ispitivanja vezana za kosmičko zračenje, odakle i potiče naziv buduće postavke :CRYME - " Cosmic Ray Multipurpose Experiment ".



Sl. 48. Aktivni veto štit Pb zaštite. Strelice označavaju usmerenost fotomultiplikatora kod bočnih veto detektora.

Detektor "A" će biti pokretan u horizontalnoj ravni (pravac levo –desno), što će obezbediti pristup zatvaraču Pb zaštite. Detektor "B" će se pomerati po visini, tako da će njegovo rastojanje u odnosu na detektor "A" moći da se podešava.



H.V.- high voltage  
 S.V.-side veto  
 U.V.-upper veto  
 L.V.-lower veto

G.&D.-gate and delay  
 AMPL.-amplifier  
 PA.-preamplifier

S1.49.Schema sistema "CRYME"

## Zaključak

U radu je opisano ukupno 8 pasivnih zaštita niskofonskih gama spektrometarskih sistema realizovanih u različitim laboratorijama, pri čemu su analizirani odgovarajući fonski spektri i upoređeni sa svojstvima spektra novoizrađene zaštite na DFNS, čija je izrada, takođe, predmet ovog magistarskog rada. Osnovni gradivni materijal kod 7 zaštita je olovo, dok je u jednom slučaju upotrebljeno gvožđe.

Komparativni prikaz brzina brojanja po jedinici efikasnosti detektora za spekture svih analiziranih zaštita dat je u Tabeli 33.

Tabela 33. Kvantitativne osobenosti fonskih spektara dobijenih primenom raznih pasivnih štitova

E[ keV ]	50-500	50-1800	65-2650	511	1461	2614.5
R <sub>e</sub> DFNS Fe * [ c/(ks <sub>eff</sub> ) ]	39.2	49.8	49.2 <sup>1)</sup>	0.53±0.02	0.057±0.007	-
R <sub>e</sub> O.Ridge * [ c/(ks <sub>eff</sub> ) ]	31.2	43.5	44.0	0.30±0.025	0.12±0.01	0.02±0.006
R <sub>e</sub> Podgorica * [ c/(ks <sub>eff</sub> ) ]	17.4	27.4	28.4	0.46±0.02	0.057±0.005	0.02±0.004
R <sub>e</sub> Max Planck [ c/(ks <sub>eff</sub> ) ]	-	-	15.9	0.15±0.003	0.0084±0.002	0.012±0.002
R <sub>e</sub> Krakov * [ c/(ks <sub>eff</sub> ) ]	-	-	44.0 <sup>2)</sup>	-	-	-
R <sub>e</sub> Zemun [ c/(ks <sub>eff</sub> ) ]	18.6	27.9	27.4	0.25±0.02	0.124±0.010	0.060±0.007
R <sub>e</sub> PTB [ c/(ks <sub>eff</sub> ) ]			0.27 <sup>3)</sup>	7.9 x 10 <sup>-4</sup>	0.0014	2.6 x 10 <sup>-4</sup>
R <sub>e</sub> DFNS Pb * [ c/(ks <sub>eff</sub> ) ]	17.5	27.1	-	0.38±0.01	0.042±0.003	-

\* zaštita u površinskoj laboratoriji

1) odnosi se na interval 65 keV-2090 keV ; 2) odnosi se na interval 80 keV-3 MeV ;

3) odnosi se na interval 40 keV-2750 keV

Razmatranje i komparacija spektralnih karakteristika za nekoliko štitova , omogućilo je da se uoče prednosti pojedinih konstrukcija, što je dovelo do izrade kvalitetne zaštite za GMX HPGe detektor u Lab. za nuk. fiziku DFNS. Iz Tabele 33. ( poslednja vrsta ) je vidljivo da fonski spektar ove zaštite pokazuje niže brzine brojanja u odnosu na spekture ostalih površinskih laboratorijskih zaštita.

Upotreba Fe kao detektorske zaštite ( Fe zaštita na DFNS ), umesto Pb , dovodi do povećanja spektralnog kontinuma ( naročito na intervalu ispod 500 keV ), obzirom na činjenicu da sloj Fe mora biti, zbog slabijih atenuacionih svojstava , znatno deblji ( ~ 25 cm ) nego sloj Pb zaštite ( ~ 10 cm ). Ako se , međutim, i kod Pb štita upotrebi suviše debelo sloj, pojavljuje se isti problem ( lab. u Oak Ridge-u; 15 cm Pb). Eksperimentalni podaci ( Pb i Fe štit DFNS) vezani za intenzitete gama linija uzrokovane neutronima na Pb i Fe , ukazuju na to da Pb ovom pogledu nije u podređenoj poziciji kao materijal zaštite.

Značajan problem, kada je u pitanju upotreba Pb, predstavlja redukcija X fluorescentnog zračenja ( $E_{X-Pb} \sim 75$  keV), dok je u slučaju Fe situacija neuporedivo povoljnija ( $E_{X-Fe} \sim 7$  keV). Uočeno je da upotreba debelog sloja Cu kao unutrašnje komponente Pb štita dovodi do porasta kontinuma niskoenergetskog dela spektra, pri čemu do izražaja dolaze i gama linije generisane neutronima na Cu (Pb+Cu zaštita u Oak Ridge-u). Ovo je potvrđeno i tokom izrade unutrašnjeg Cu sloja za Pb zaštitu na DFNS. Upotreba Cd dovodi do pojave relativno intenzivnih linija uzrokovanih neutronima (Pb+Cd zaštita detektora u Podgorici). Analiza fonskih spektara tokom kompletiranja Pb zaštite za GMX HPGe detektor, pokazala je da primena sloja Sn (3.5 mm) + Cu (0.5 mm) predstavlja optimalno rešenje.

Velika zapremina detektorske zaštite omogućava značajno prisustvo Rn neposredno oko detektora, što se manifestuje intenzivnim postradonskim linijama u fonskom spektru (Fe zaštita DFNS). Varijacije u intenzitetu postradonskih linija odražavaju se na merenu vrednost koncentracije aktivnosti Bi-214, Pb-214, odnosno Ra-226 u ispitivanom uzorku (sistemska greška od 4.5 % za merenje u Fe štitu). Zbog ovih razloga je konstruisana mala korisna zapremina Pb štita za GMX DFNS. "Ispiranje" unutrašnjosti zaštite azotom iz DEWAR-ovog HPGe detektor na DFNS. "Ispiranje" unutrašnjosti zaštite azotom iz DEWAR-ovog suda, pokazalo se delotvorno u otklanjanju postradonskih linija, čime su poboljšane performanse zaštite.

Postavljanje detektorske zaštite ispod sloja zemljišta od oko 20 mwe (lab. u Zemunu), redukuje mionima indukovani kontinuum na celokupnom energetskom intervalu (50 – 2500 keV) za ~ 50 % u odnosu na površinski lociranoj zaštiti. Takođe, prisustvo pokrovnog sloja ovde se jasno manifestuje u vidu opadanja intenziteta gama linija indukovanih neutronima. Ipak, okruživanje detektora zemljištem u  $4\pi$  geometriji vodi ka porastu intenziteta linija prirodnih radioizotopa, posebno K-40. Termalizovanje neutrona pomoću sloja parafina (lab. u Krakovu), ne pokazuje vidljiv napredak u redukovanim integralnim odbrojima u odnosu na štitove bez parafina.

Postavka detektorske zaštite duboko ispod površine zemlje omogućava upotrebu debljeg sloja Pb (PTB laboratorija; 20 cm Pb), te je ukupan postignuti efekat na redukovanim integralnim odbrojima daleko bolji nego kod zaštite na površini (Tabela 33., 8. vrsta).

Kada se razmatra relativni preostali intenzitet linije od 511 keV, značajno je proceniti koliki doprinos njenom ukupnom intenzitetu daje Tl-208, kako bi se utvrdilo kakav je kvalitet određene zaštite sa stanovišta redukcije anihilacione komponente linije koja je dominantna posledica interakcije miona sa materijalom štita. U slučaju Pb+Sn+Cu zaštite na DFNS ukupni relativni preostali intenzitet na 511 keV je 5.5 %, dok je preostali intenzitet anihilacione komponente linije 10 %.

Sa zidom debljine 10 cm, umesto realizovanih 12 cm kod Pb zaštite na DFNS, postigao bi se bolji rezultat kada je u pitanju redukcija mionskog kontinuma, međutim, pošto će zaštita biti opkoljena aktivnim štitom, u takvim okolnostima veća debljina zida obezbeđuje niži fonski odbroj.

## Prilog

Fluks fotona  $\sim 1 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  korespondira brzini brojanja u meti ( detektoru ) od  $\sim 10^6 \text{ d}^{-1}\text{kg}^{-1}$ . Da bi se brzina brojanja smanjila  $10^6$  puta , potrebna je debljina štita  $\approx 250\text{-}280 \text{ g/cm}^2$  . Ovo je , u principu, dostižno korišćenjem npr. 25 cm olova, ali praktično teškoća se javlja zbog pitanja da li je nivo radioaktivnosti u samom materijalu zaštite dovoljno nizak.

Neka je  $B$  koncentracija aktivnosti materijala štita [Bq/g]. Za gama kvante radionuklida emitovane u MeV-skom opsegu , atenuacija fotonskog fluksa  $\Phi_\gamma$  kroz debljinu  $x$  ( $[x]=\text{g/cm}^2$ ) je opisana sa

$$\frac{d\Phi_\gamma}{dx} = -\frac{\Phi_\gamma}{\lambda_\gamma} + B \quad \text{ili}$$

$(\Phi_\gamma - B\lambda_\gamma) = (\Phi_{\gamma 0} - B\lambda_\gamma) e^{-\frac{x}{\lambda_\gamma}}$  , gde  $\lambda_\gamma$  ima vrednost  $15\text{-}25 \text{ g/cm}^2$  u energetskom opsegu 1-5 MeV za većinu materijala. Tako fluks  $B\lambda_\gamma$  koji nastaje zbog radioaktivnosti štita , mora zadovoljiti uslov  $B\lambda_\gamma < \Phi_\gamma$ , odnosno  $B\lambda_\gamma \ll \Phi_\gamma$ .

Ovi kriterijumi odgovaraju modelu u kojem je meta okružena sfernim slojevima zaštitnog materijala.

Fluks fotona  $\Phi_{c\gamma}$  [  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  ] proizveden komponentom c aktivnosti  $B_c$  [ Bq/g ], mase  $m_c$  [ g ], debljine  $\ll \lambda_\gamma$  na rastojanju  $r$  od mete je dat sa

$$\Phi_{c\gamma} = B_c m_c / 4\pi r^2 ,$$

dok je fluks proizведен aktivnošću  $B_s$  u sfernom štitu

$$\Phi_{s\gamma} = B_s \lambda_\gamma = B_s m_s / 4\pi r^2 .$$

Iz prethodne dve jednačine sledi

$$\frac{B_c}{B_s} \cdot \frac{\Phi_{c\gamma}}{\Phi_{s\gamma}} = \frac{m_s}{m_c} \quad , \text{ gde je } m_s = 4\pi r^2 \lambda_\gamma \text{ masa sfernog sloja debljine } \lambda_\gamma \text{ [ g/cm}^2\text{]}.$$

## Literatura

1. Monografija: JONIZUJUĆA ZRAČENJA IZ PRIRODE, Institut za nuklearne nauke "Vinča", Beograd 1995.
2. J. Slivka, I. Bikit, M. Vesović, Lj. Čonkić, GAMA SPEKTROMETRIJA-SPECIJALNE METODE I PRIMENE, Univerzitet u Novom Sadu, Edicija Univerzitetska naučna knjiga, Novi Sad 2000.
3. Pall Theodorsson, MEASUREMENT OF WEAK RADIOACTIVITY, World Scientific Publishing Co.Pte.Ltd., Singapore 1996.
4. LOW LEVEL GAMMA SPECTROSCOPY, Canberra Reference 2, Canberra, U.S.A.
5. G.Heusser, BACKGROUND IN IONIZING RADIATION DETECTION-ILLUSTRATED BY Ge – SPECTROMETRY, MPI H-V26-93, Max Planck-Institut fur Kernphysik, Heidelberg, Germany, 1993.
6. Application Note, ULTRA LOW-BACKGROUND DETECTOR SYSTEMS,Canberra, CAN0012 8/95, U.S.A.
7. S.Neumaier, D.Arnold, J.Bohm, E.Funck, THE PTB UNDERGROUND LABORATORY FOR DOSYMETRY AND SPECTROMETRY, Applied Radiation and Isotopes 53, 173-178, 2000.
8. R.L.Brodzinski. J.H.Reeves, F.T. Avignone and H.S. Miley, *Nucl.Instr.Meth.* , A254 (1987) 472
9. J.M.Puzovic, I.V.Anicin, PRODUCTION OF POSITRON ANNIHILATION RADIATION BY COSMIC RAYS NEAR SEA LEVEL, Nuclear Instruments and Methods , A480, 565-570, 2002
10. O.C. Allkofer and P.K.F. Grieder, COSMIC RAYS ON EARTH,*Physics Data Nr. 25-I* ( 1984 )
11. R.L.Bunting, J.J.Kraushaar, SHORT-LIVED RADIOACTIVITY INDUCED IN Ge(Li) GAMA-RAY DETECTORS BY NEUTRONS, Nuclear instruments and Methods II 8, 1974, 565-572
12. MODULAR PULSE-PROCESSING ELECTRONICS AND SEMICONDUCTOR RADIATION DETECTORS, EG&G ORTEC, 97/98
13. G.Heusser: COSMIC RAY INTERACTION STUDY WITH LOW-LEVEL Ge-SPECTROMETRY,Nuclear Instruments and Methods, A369, 539-543, 1996.

14. N.A. Wogman and J.C. Laul, in Proc. NATURAL RADIATION ENVIRONMENT, Bombay 1981, eds.K.G. Vohra et al. ( Wiley, New Delhi, 1981) 247
15. M.Eisenbud, in ENVIRONMENTAL RADIOACTIVITY ( academic Press, New York, 1973)
16. M.Ivanovich and R.S. Harmon, eds., URANIUM SERIES DISEQUILIBRIUM: APPLICATIONS TO EARTH,MARINE, AND ENVIRONMENTAL SCIENCES,( Clarendon Press Oxford, 1992 ).
17. G. Spannagel and G. Heusser, METEORITE RESEARCH, ed. P. Millman ( D.Reidel, Dordrecht,1969) p. 372
18. T.Kirsten and W.Hampel, in Proc.INTERN.CONF. ON LOW RADIOACTIVITY MEASUREMENTS AND APPLICATIONS, The High Tatras, Czechoslovakia 1975,eds. P.Povinec and S.Usacev ( Slovenske Pedagogicke Nakladatelstvo, bratislava, 1977) 427
19. I.Bikit, L.Marinkov, M.Vesković, LOW-LEVEL SHIELD FOR GAMMA-SPECTROMETERS, XXVIII Yug. Conf. of ETAN, Split 1984, ETAN VI 51 ( 1984 ).
20. I.Bikit, J.Slivka, M.Krmar, Z.Djurcic, N.Zikic, Lj.Conkic, M.Veskovic, I.Anicin, DETECTION LIMITS OF THE NaI(Tl) SHIELDED HPGe SPECTROMETER, Nuclear Instruments and Methods, A421, 266, 1999.
21. G.Heusser, LOW-RADIOACTIVITY BACKGROUND TECHNIQUES, Annu. Rev.Nucl. Part. Sci. 45, 543-590, 1995.
22. D.S.Mrdja, I.S.Bikit, I.V.Anicin, J.M.Slivka, J.J. Hansman, N.M. Žikić- Todorović , E.Z. Varga, S.M. Ćurčić , J.M.Puzović, BACKGROUND REDUCTION OF USING Fe AND Pb SHIELDING, Fifth General Conference of the Balkan Physical Union BPU-5, Vrnjačka Banja 2003., Serbian Physical Society, Belgrade, 2003.
23. Monica Sisti, CRESST - a Cryogenic Experiment for Dark Matter Search, Hieronymus, Munchen, 1999.
24. P.Meunier, M. Bravin, M. Bruckmayer, S.Giordano, M. Loidl, O. Meier, F. Probst, W. Seidel, M.Sisti, L.Stodolsky, S.Uchaikin, and L.Zerle, DISCRIMINATION BETWEEN NUCLEAR RECOILS AND ELECTRON RECOILS BY SIMULTANEOUS DETECTION OF PHONONS AND SCINTILLATION LIGHT, Applied Physics Letters , Volume 75, Number 9, 1999.

25. C. Bucci, M. Altmann, M. Cozzini, P. DiStefano, T. Frank, D. Hauff, F. Probst, W. Seidel, I. Segeyev, L. Stodolsky, F. von Feilitzsch, Th. Jagemann, J. Jochum, J. Schnagl, M. Stark, H. Wulandari, G. Angloher, N. Bazin, S. Cooper, S. Henry, R. Keeling, H. Kraus, J. Macallister, C. Perry, Y. Ramachers, UPDATE OF PROPOSAL TO THE LNGS FOR A SECOND PHASE OF THE CRESST DARK MATTER SEARCH , MPI-PhE/2001-02 , 2001



## Kratka biografija



UNIVERSITET U NOVOM SADU  
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
DOKTORSKA DISCIPLINA: INFORMATIČKA INFORMACIJA

Mrđa Dušan je rođen u Bihaću, B i H , 1.maja 1977. godine.Osnovnu školu završio je u Bosanskom Petrovcu. Gimnaziju opšteg smera završio je 1996. godine u Bačkoj Palanci. Za postignut uspeh tokom školovanja dobitnik je diplome "Vuk Stefanović Karadžić". Na Prirodnomatematickom fakultetu, Univerziteta u Novom Sadu diplomirao je 2001. godine-odsek fizika, smer diplomirani fizičar, sa prosečnom ocenom 9.62. Poslediplomske studije je upisao 2001. na Departmanu za fiziku PMF-a u Novom Sadu , smer Nuklearna fizika.

Kao tehnički saradnik Departmana za fiziku zaposlen je 2001. godine, a od marta 2002. godine radi kao stručni saradnik. U periodu april-jul 2002. godine boravio je u cilju stručnog usavršavanja na Institutu Max-Planck u Minhenu. U februaru 2003. godine izabran je u zvanje istraživača- pripravnika, naučna oblast-fizika, uža naučna oblast-nuklearna fizika. Koautor je većeg broja naučnih i stručnih radova.

Za studente astronomije sa astrofizikom obavlja nastavnu aktivnost iz eksperimentalnih i računskih vežbi u okviru predmeta Fizika I i Fizika II .

Oblast rada kojom se bavi je gama-spektrometrija, interakcija zračenja sa materijom, merenje atenuacionih koeficijenata za gama zračenje.

Novi Sad,  
20.04.2004.

Dušan Mrđa

**UNIVERZITET U NOVOM SADU  
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA**

Redni broj:

RBR

Identifikacioni broj:

IBR

Tip dokumentacije: Monografska dokumentacija

TD

Tip zapisa: Tekstualni štampani materijal

TZ

Vrsta rada: Magistarska teza

VR

Autor: Mrda Dušan

AU

Mentor: prof. dr Ištvan Bikit

Mn

Naslov rada: Komparativna studija pasivnih zaštita za gama spektrometre

NR

Jezik publikacije: Srpski (latinica)

JP

Jezik izvoda: Srpski/Engleski

JI

Zemlja publikacije: Srbija i Crna Góra

ZP

Uže geografsko područje: Vojvodina

UGP

Godina: 2004.

GO

Izdavač: Autorski reprint

IZ

Mesto i adresa: Novi Sad, Antona Čehova 32

MA

Fizički opis rada: 7 poglavlja/ 73 strane/ 25 literaturih citata/ 36 tabela/ 55 slika

FO

Naučna oblast: Fizika

NO

Naučna disciplina: Nuklearna fizika

ND

Ključne reči: gama-spektrometrija, pasivna zaštita, fonska brzina brojanja

PO

UDK:

Čuva se:

ČU

Važna napomena: Ovaj rad je urađen u okviru naučno-istraživačkog projekta broj 1859  
"Nuklearna spektroskopija i retki procesi" Ministarstva za nauku, tehnologiju i  
razvoj Republike Srbije

VN

Izvod:

IZ

## KOMPARATIVNA STUDIJA PASIVNIH ZAŠTITA ZA GAMA SPEKTROMETRE

Opisane su i upoređene konstrukcije i osobine 8 pasivnih zaštita za gama spektrometre. Diskutovan je uticaj različitih materijala zaštite, kao i njihovih dimenzija , na intenzitetu određenih linija i spektralnog kontinuma.

Prikazana je konstrukcija nove Pb zaštite za detektor tipa GMX. Pokazano je da se novi dizajn odlikuje boljim performansama zaštite nego većina niskofonskih sistema koji su smešteni u površinskim laboratorijama.

Predložena je nadgradnja sistema korišćenjem aktivnih antikosmičkih štitova.

Datum prihvatanja teme od strane NN veća: 20.11.2003.

DP

Datum odbrane:

DO

Članovi komisije:

KO

Predsednik: dr Miroslav Vesović, redovan profesor

Prirodno-matematičkog fakulteta u Novom Sadu

Član: dr Ištvan Bikit, redovan profesor

Prirodno-matematičkog fakulteta u Novom Sadu

Član: dr Jaroslav Slivka, redovan profesor

Prirodno-matematičkog fakulteta u Novom Sadu

Član: dr Ivan Aničin, redovan profesor

Fizičkog fakulteta u Beogradu

**UNIVERSITY OF NOVI SAD  
FACULTY OF SCIENCES  
KEY WORDS DOCUMENTATION**

Accession number:

ANO

Identification number:

INO

Document type: Monograph document

DT

Type of record: Printed text

TR

code:

Contents

CC

Author: Mrdja Dusan

AU

Mentor: prof. dr Istvan Bikit

MN

Title: Comparative study of passive shields for gamma spectrometers

TI

Language of text: Serbian (Latinic)

LT

Language of Abstract: Serbian/English

LA

County of publication: Serbia and Montenegro

CP

Locality of publication: Vojvodina

LP

Publication year: 2004.

PY

Publisher: Author's reprint

PU

Publ. Place: Novi Sad, Antona Čehova 32

PP

Physical description: 7 chapters/ 73 pages/ 25 literature/ 36 tables/ 55 pictures

PD

Scientific field: Physics

SF

Scientific discipline: Nuclear Physics

SD

Key words: gamma spectrometry, passive shield, low-level count rate

KW

UC:

Holding data:

HD

Note: This work was supported by the Serbian Ministry of Science, Technology and Development, Project No. 1859 "Nuclear Spectroscopy and Rare Processes"

N

Abstract:

AB

## COMPARATIVE STUDY OF PASSIVE SHIELDS FOR GAMMA SPECTROMETERS

The construction and performances of 8 passive shields for gamma spectrometers are described and compared. The influence of various shielding materials and their dimensions on some line intensities and on the spectral continuum are discussed.

The construction of the new Pb shield for the GMX type detector is presented. It is shown that the new design gives better shielding performances than most of the low level systems operated at the sea level.

The upgrade of this system with active anticosmic shields is suggested.

Accepted by the Scientific Board on: 20.11.2003.

ASB

Defended:

DE

Thesis defend board:

DB

President: dr Miroslav Vesović, full professor, Faculty of Sciences, Novi Sad

Member: : dr Ištván Bikit, full professor, Faculty of Sciences, Novi Sad

Member: : dr Jaroslav Slivka, full professor, Faculty of Sciences, Novi Sad

Member: : dr Ivan Aničin, full professor, Faculty of Physics, Belgrade