

УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ПРИРОДНОМАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ
ИНСТИТУТ ЗА ФИЗИКУ

16	16	-02-	1989
Број	Додатак	Месец	Година
03	10	12	

D I P L O M S K I R A D

MERENJE ANIZOTROPIJE EFIKASNOSTI Ge DETEKTORA

mentor :
Dr. Ištvan Bikit

kandidat :
Milivoj Bajagić

februar 1989.

SADRŽAJ

1. UVOD	3
2. SPECIFIČNA SVOJSTVA GERMANIJUMA	4
3. KONSTRUKCIJA I PRINCIP RADA KOAKSIJALNOG Ge DETEKTORA SA P-i-N SPOJEM	6
4. KOAKSIJALNI Ge DETEKTOR-MODEL 7600s1S	9
5. KORIŠĆENJE Ge DETEKTORA U "IN SITU" SPEKTOMETRIJI	12
6. EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE ANIZOTROPIJE EFIKASNOSTI KOAKSIJALNOG Ge DETEKTORA - MODEL 7600s1S	23
7. ZAKLJUČAK	28
 LITERATURA	30
PRILOZI	

1. UVOD

Pronalazak poluprovodničih materijala i razvoj tehnologije njihove proizvodnje uslovili su im primenu u raznim oblastima nauke i tehnike. Zahvaljujući svojim svojstvima ovi materijali su potisnuli iz upotrebe mnoge glomazne uređaje koji su se zasnivali na tehnički gasnih cevi, a svoju primenu su našli i u oblasti detekcije nuklearnog zračenja.

Prednost poluprovodničkih detektora u odnosu na klasične je u veoma dobroj moći razlaganja, i pri radu s njima nisu potrebni izvori visokih aktivnosti. Iako imaju nešto nižu efikasnost od klasičnih detektora našli su veliku primenu naročito u γ -spektrometriji.

Osim u fundamentalnim istraživanjima iz nuklearne fizike, γ -spektrometrija ima sve širu primenu u zaštiti prirodne sredine od izvora ionizujućih zračenja. Radioaktivna kontaminacija životne sredine se može istraživati ili uzimanjem uzoraka i njihovim merenjem u niskofonskim uslovima u laboratoriji ili merenjima na terenu ("in situ"). Ove metode su uzajamno komplementarne i prva omogućuje direktno određivanje koncentracije aktivnosti radionuklida u prirodnim uzorcima i procenu ingestionih doza, dok druga pruža informaciju o doprinosu pojedinih radionuklida ekspozicionoj (spoljašnjoj) dozi i distribuciji radionuklida u prirodnoj sredini.

Za obe primene je neophodno odrediti efikasnost detekcije, a ta nam osobina detektora zavisi i od energije γ -zračenja i od rasporeda izvora zračenja u odnosu na detektor. Za "in situ" merenja je neophodno određivanje anizotropije efikasnosti detekcije.

Pošto je efikasnost detekcije zračenja vrlo značajna osobina detektora i znajući da u velikoj meri zavisi od načina i geometrije proizvodnje elemenata koji čine detektor, naročito poluprovodničkih kristala, potrebno je bilo ispitati anizotropiju efikasnosti detekcije γ -zračenja za njih. Upravo, to je i cilj ovog rada.

2. SPECIFIČNA SVOJSTVA GERMANIJUMA

Pri spektrometriji γ - zračenja koriste se detektori sa poluprovodničkim kristalima elemenata većeg rednog broja Z, pošto se na taj način povećava verovatnoća apsorpcije zračenja koje dospe u detektor. Naime, γ - zračenje niskih energija interaguje sa medijumom skoro isključivo preko foto-efekta, čija se verovatnoća nastanka meri presekom koji je srazmeran rednom broju elementa medijuma na peti stepen ($\sigma_f \approx Z^5$). U naše vreme najbolje pogodnosti u tom smislu pokazao je germanijum ($Z = 32$).

Neka specifična svojstva germanijuma su sledeća :

- četvorovalentan
- energija veze : 1.6 eV
- elektronska konfiguracija : $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^2$
- radijus atoma : 0.106 nm
- osnovno stanje (term) : $3P_0$
- magnetna susceptibilnost : -0.22
- sopstvena koncentracija elektrona na $T=300$ K : $n_i = 2.5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$
- električna otpornost : $\rho = 43 \Omega \text{cm}$ spoljna strana $\text{N} \cdot \text{cm}^{-2}$
- vrednost energetskog procepa između valentne i provodne zone na $T=300$ K je 0.67 eV
- pokretljivost nosilaca nanelektrisanja :

T	ELEKTRONI	SUPLJINE
300 K	$3900 \text{ cm}^2/(\text{Vs})$	$1900 \text{ cm}^2/(\text{Vs})$
77 K	$3.6 \cdot 10^4 \text{ cm}^2/(\text{Vs})$	$4.2 \cdot 10^4 \text{ cm}^2/(\text{Vs})$

- atomska masa : $A = 72.60$ a.j.m.
- kristalna struktura je kubna površinsko centrirana (dijamantska)
- motiv je dvoatomni (dva identična atoma Ge₁ i Ge₂)
- koordinacioni broj (okruženje) : KB = 4

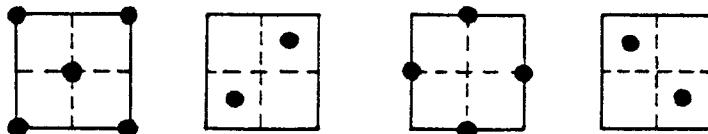
- koordinate :

$$Ge_1: \left[0 \ 0 \ 0 \right] \left[0 \ \frac{1}{2} \ \frac{1}{2} \right] \left[\frac{1}{2} \ 0 \ \frac{1}{2} \right] \left[\frac{1}{2} \ \frac{1}{2} \ 0 \right]$$

$$Ge_2: \left[\frac{1}{4} \ \frac{1}{4} \ \frac{1}{4} \right] \left[\frac{1}{4} \ \frac{3}{4} \ \frac{3}{4} \right] \left[\frac{3}{4} \ \frac{1}{4} \ \frac{3}{4} \right] \left[\frac{3}{4} \ \frac{3}{4} \ \frac{1}{4} \right]$$

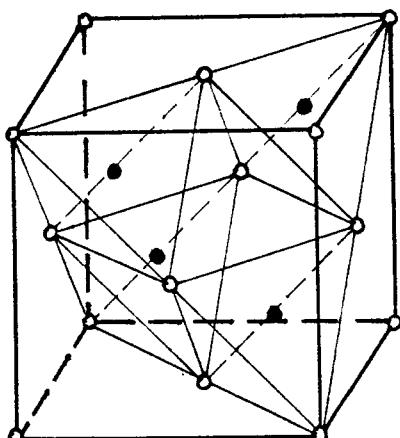
- parametar elementarne čelije : $a = 0.56575$ nm

- sekcije : $z = 0$ $z = \frac{1}{4}$ $z = \frac{1}{2}$ $z = \frac{3}{4}$



- faktor popunjenošti : 34 %

- izgled elementarne čelije :



tetraedar unutar kog
može da stane jedan
atom

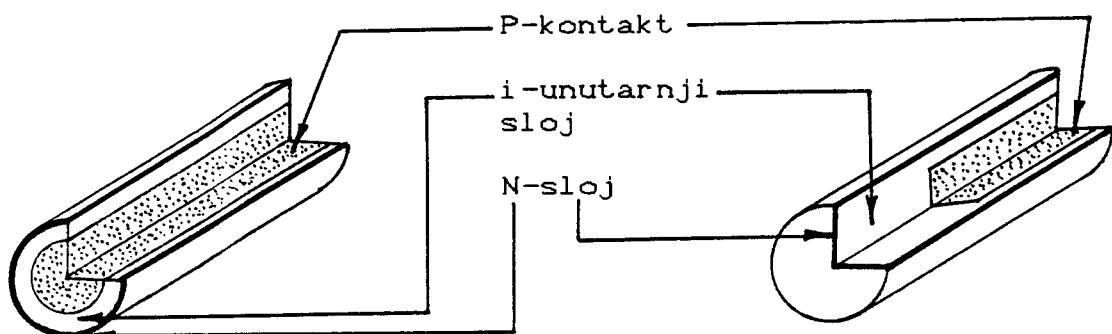
Kao što se vidi sa slike koja predstavlja elementarnu čeliju germanijuma, periferni elektroni (Ge atom ih ima četiri) kovalentno se vezuju sa elektronima najbližih suseda u kristalnoj rešetki. Naime, pošto je Ge četvorovalentan, a njegove veze su usmerene ka rogljevima tetraedra u čijem centru se nalazi atom germanijuma ovako se ostvaruje najjača veza između atoma, pošto se susedni atomi nalaze tačno na pravcima usmerenih veza. Tako formirana kovalentna veza snižava energetske nivoje elektrona.

3. KONSTRUKCIJA I PRINCIP RADA KOAKSIJALNOG Ge DETEKTORA SA P-i-N SPOJEM

Jednak broj šupljina i elektrona moguć je samo kod besprimesnog germanijuma. Međutim, da bi smo ostvarili poluprovodnik P odnosno N-tipa u kristal je potrebno ubaciti nečistoće koje remete ravnotežu između elektrona i šupljina, pa dobijamo u tom slučaju, glavne i sporedne nosioce nanelektrisanja. Ubacivanjem "nečistoća" koje potiču iz treće grupe elemenata Mendeljejevog sistema povećava se koncentracija šupljina i dobija se poluprovodnik P-tipa, a primesni atomi nazivaju se akceptorski. U slučaju "nečistoća" iz pete grupe povećava se koncentracija elektrona i dobija se poluprovodnik N-tipa sa donorskim primesnim atomima. Ovde treba dodati da primesni, koje se ne jonizuju ne utiču na koncentraciju nosilaca nanelektrisanja, i mogu biti prisutne u većoj meri, a da ne budu detektovane električnim merenjima.

Prema načinu formiranja PN-prelaza poluprovodnički detektori se dele na detektore sa površinskom barijerom, difuzione i detektore sa P-i-N prelazom. Ovi poslednji su najpogodniji za detekciju γ -zračenja pošto imaju dovoljno veliku zapreminu osetljive oblasti, a time i dosta dobru efikasnost detekcije za tu vrstu zračenja.

P-i-N detektori mogu biti izgrađeni kao planarni ili kao koaksijalni. Koaksijalni se proizvode na jedan od dva osnovna načina geometrijskog rasporeda :



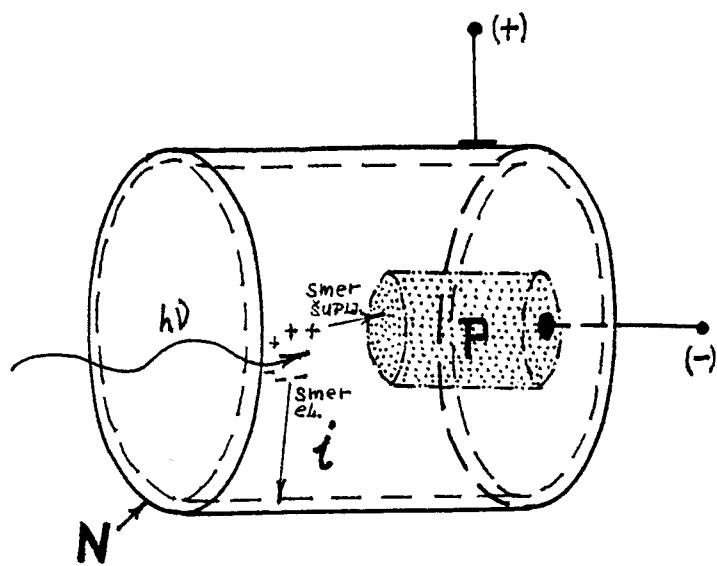
Sl.3.1. Pravi koaksijalni

Sl.3.2. Zatvoren i koaksijalni

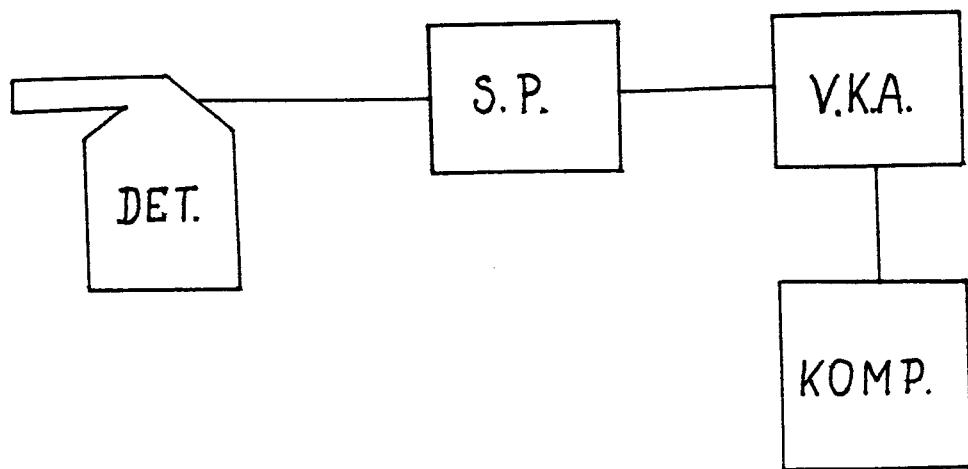
"Sirovina" materijala za Ge detektore je germanijumski monokristal P-tipa proizведен metodom Czochralski-og (kristal se dobija izvlačenjem iz rastopa) sa nečistoćama čiji je stepen koncentracije 10^{10} atoma/cm³. Kontaktni n-sloj se formira difuzijom litijuma na površinu Ge monokristala P-tipa na povišenoj temperaturi (300 - 600°C) za vreme od nekoliko minuta do jednog časa. Spoljašnji N-sloj se dobija metodom naparavanja nekog pogodnog metala (zlato, bakar, ...). Pri tome N-sloj mora biti vrlo tanak da na njemu ne bi došlo do značajne atenuacije upadnog γ -zračenja.

Ovako dobijen unutarnji i-sloj karakteriše ravnoteža slobodnih nosilaca nanelektrisanja, i njegova širina ulazi u aktivni deo poluprovodnika za detekciju. i-sloj predstavlja osetljivu oblast između P i N dela i u zavisnosti od veličine njegove zapremine je efikasnost detekcije upadnog γ -zračenja. Pošto u i-sloju ostaje vrlo mali broj nosilaca, njegova provodnost je mala u odnosu na provodnost P i N slojeva. Stvaranjem inverznog napona u i-sloju nastaje jako električno polje. Jačina električnog polja u i-unutarnjoj ispraznjenoj zoni mora biti dovoljna da sakuplja nastale nosioce koji su proizvod fotonskih interakcija.

Prilikom upada γ -kvanta u i-sloj dolazi do formiranja parova elektron-šupljina. Pri inverznoj polarizaciji P-i-N spoja nastali elektroni kreću se ka spoljašnjem N-sloju a šupljine ka unutrašnjem P-kontaktu. Na ovaj način se energija γ -zračenja u detektoru pretvara u električne signale. Pošto su dobijeni električni signali slabi, oni se pomoću predpojačavača, koji je ugrađen u detektor, i služi kao transformator impedanse, prenose do spektroskopskog pojačavača pomoću koaksijalnog kabla. Spektroskopski pojačavač pojačava i uobičava primljene impulse i sa njega se kablovski oni prenose na višekanalni analizator. Višekanalni analizator primljene pojačane impulse sortira po visini i tada oni daju spektar.



Sl. 3.4. Prikaz načina detekcije γ -zraka u P-i-N spoju kod zatvorenog i koaksijalnog detektora



Sl. 3.4. Šema spektrometarskog sistema

4. KOAKSIJALNI Ge DETEKTOR-MODEL 7600s1S

Pošto poluprovodnički kristal detektora ima osobinu anizotropije usled raznih primesa, koje u sebi sadrži, a i s obzirom na geometriju koja je primenjena prilikom njegove proizvodnje, značajnu ulogu u efikasnosti detekcije γ -zračenja ima i uzajamni položaj radioaktivnog elementa i detektorskog kristala. Upravo ta anizotropija efikasnosti Ge detektora je i predmet ispitivanja ovog eksperimenta.

Ispitivanje je vršeno sa Ge detektorma čija je specifikacija sledeća :

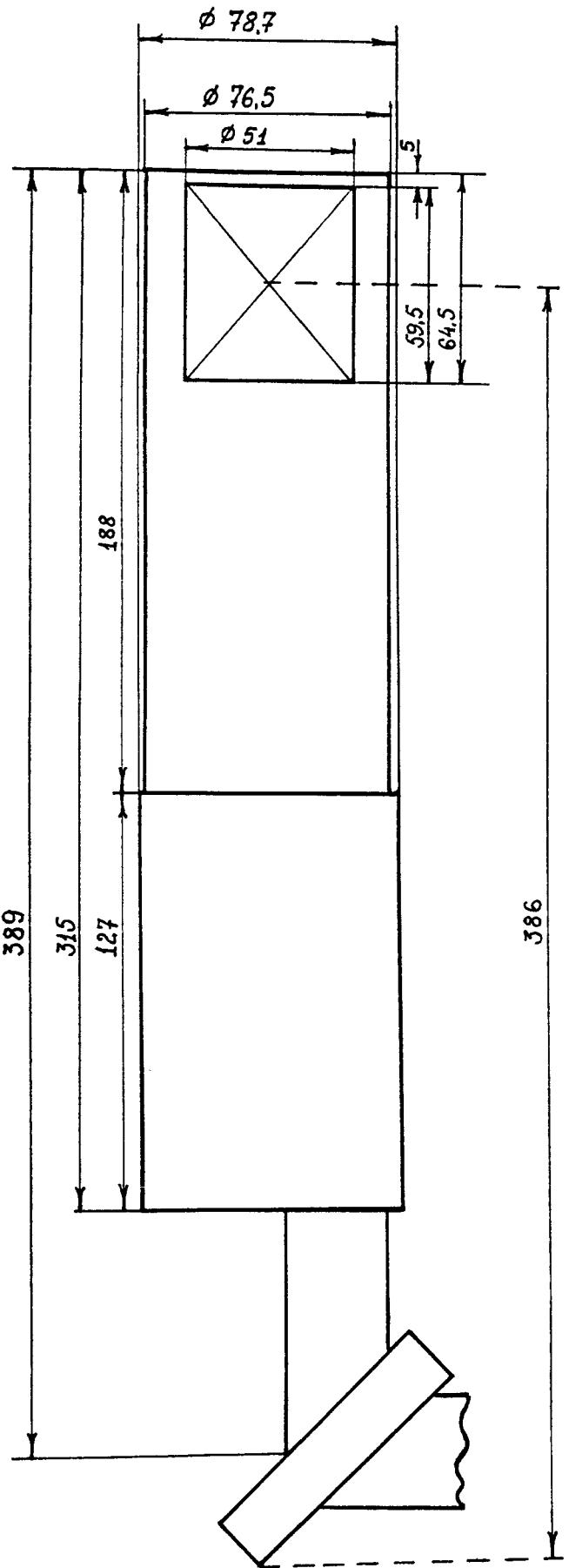
- model br.: GC2520 - 7600s1S
- br. serije : b 87053
- opis kriostata : horizontalni "dipstick" tip 7600s1 Special
6"Endcap
- geometrija : cilindrični sa jednim otvorenim krajem, zatvoreni kraj izložen prozoru
- prečnik kristala : 51 mm
- dužina kristala : 59.5 mm
- aktivna površina izložena prozoru : 2042.8 mm²
- napajanje detektora : 4000 V
- radni napon predpojačavača : -2.4 V
- vremenska konstanta rada celokupnog sistema : 4 μ s

Detektorski elemenat se hlađi do temperature tečnog azota.

Detektor je sačinjen od detektorskog elementa, predpojačala, visokonaponskog filtra, kućišta sa rezervoarom tečnog azota, vakuumski izolovane cevi sa duplim zidom ("dewar") i udubljene cevi ("dipstick").

Detektorski elemenat je postavljen u unutrašnjosti detektorske glave i obmotan omotačem gde je električno izolovan, ali je termički povezan sa bakarnim hladnim prstom ("dipstick"). Ovaj hladni prst je umetnut u glavu vakuumski izolovane cevi sa duplim zidom do detektorskog elementa i on prenosi toplotu koja se sakupi u detektorskom elementu u rezervoar sa tečnim azotom.

Detektorski omotač je generalno proizveden od aluminijuma, debljine od 0.5 do 1 mm i on je utoliko bolji ukoliko je tanje izrađen "end cap" (spoljašnji vakuumski omotač), i to zbog toga da bi vršio što manju atenuaciju energije γ -zračenja. "End cap" je takođe generalno urađen od aluminijuma, tipične debljine oko 1.5 mm sa strane, a 0.5 mm prema prozoru detektoru. Detektorski omotač poseduje i antimikrofonski stabilizator. Čeoni deo detektorskog elementa je lociran tipično 5 mm od "end cap"-a.



Sl. 4.1. Crtež glave detektor-a (razmer 1:2)

5. KORIŠĆENJE Ge DETEKTORA U "IN SITU" SPEKTOMETRIJI

Gama radijacija u našoj okolini nastaje delimično od prirodnih radionuklida a delimično od veštački proizvedenih radioaktivnih izvora, koji se prenose u obliku atmosferskih padavina i nastali su prilikom testova nuklearnog oružja. Merenja γ -radijacije okoline Ge(Li) spektrometarskim sistemima daju detaljne informacije o prisustvu γ -emitujućih radionuklida u zemljишtu i ustanovljavaju zavisnost ekspozicionih doza od koncentracije radionuklida. Pomoću nekih mobilnih sistema moguće je detektovati u tragovima prisustvo veštačkih radioaktivnih izvora u okolini, i pojedine države, sada, primenjuju sličnu opremu pri kontroli prirodne sredine od kontaminacije.

Prilikom određivanja koncentracije radionuklida u zemljишtu, terenska merenja imaju značajnu prednost u poređenju sa laboratorijskim merenjima na sakupljenim uzorcima zemljишta, pošto detektor kod terenskih merenja registruje radijaciju od nekoliko tona zemljишta, dok u drugom slučaju se količina zemljишta iz praktičnih razloga ograničava na svega nekoliko kilograma. Rezultati dobijeni merenjem radioaktivnosti zemljишta u prirodi su mnogo reprezentativniji od onih koji se dobijaju laboratorijskim putem. Pri tome, vreme merenja radioaktivnosti zemljишta u prirodi prema vremenu merenja u laboratorijskim uslovima treba da se odnosi kao jedan prema deset da bi se na osnovu laboratorijskih merenja mogla dobiti ista statistička preciznost.

Kvantitativna merenja prodorne okolne radijacije od zemaljskih izvora i od sekundarne kosmičke radijacije prvo su vršena pomoću ionizacionih komora. Kasnije, terenska γ -spektroskopija uključuje NaJ(Tl) detektore, proizvedene zbog mogućnosti kvalitetnije i kvantitativnije determinacije glavnih doprinosioca γ -radijaciji u našoj okolini i radi povezivanja vrednosti ekspozicionih doza sa koncentracijom radionuklida. Ova tehnika je najviše unapređena upotrebom lako pokretljivih velikih Ge(Li) detektora, koji su superiornijom rezolucijom energija γ -zračenja adekvatno kompenzovali slabiju efikasnost detekcije u odnosu na NaJ(Tl) detektore.

Glavninu γ -radijacije koja potiče od zemljišta predstavlja rasejano γ -zračenje uzrokovano raspadom radionuklida u zemljištu. Prilikom merenja, instrumentalni proizvod je γ -spektar koji je projekcija energetske distribucije γ -zračenja u detektoru. Rasejano γ -zračenje, koje je detektovano, nema deo svoje inicijalne energije zbog propratne atenuacije od strane zemljišta, vazduha i detektora, i to γ -zračenje daje doprinos fonu (background-u) (kao sporoj promeni intenziteta sa energijom u spektru). Manjinska frakcija ukupnog broja detektovanih γ -zraka dolazi direktno od nuklida u raspodu iz zemljišta u detektor i predaje svu inicijalnu energiju, tako produkujući foto-vrhove u spektru. Pozicija i intenziteti tih vrhova daju informaciju o identitetu i kvantitetu γ -emitujućih radionuklida u zemljištu.

Obrada Ge(Li) spektara se bazira na tehnici koju je primenjivao H.L. Beck. Njen osnovni principijelni sadržaj je u činjenici da odbroj impulsa unutar foto-vrhova u spektru je proporcionalan koncentracijama odgovarajućih γ -emitera u zemljištu. Saglasno tom principu, jednostavni opšti faktori se računaju za svaki vrh u spektru, i ti energetski zavisni faktori daju proračun raspodele vrhova kolimisanog γ -zračenja, efikasnosti detektora i kolimisanog γ -fluksa koji potiče od izvora u zemljištu. To se predstavlja jednačinom :

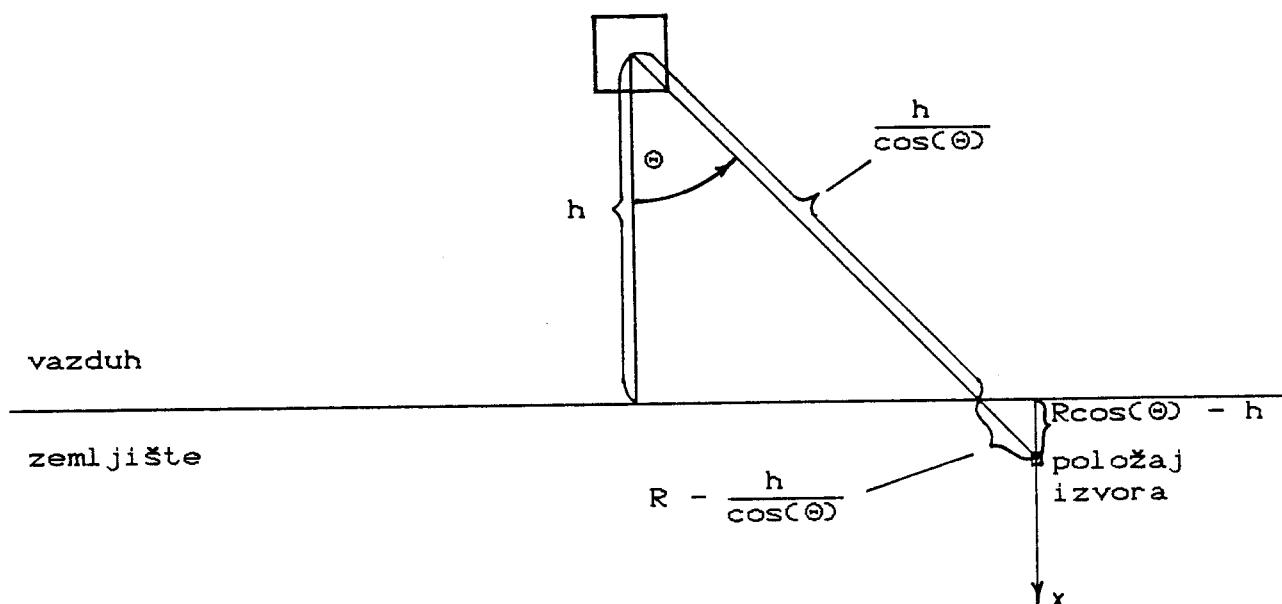
$$\frac{N_f}{S} = \frac{N_f}{N_o} \frac{N_o}{\Phi} \frac{\Phi}{S} \quad (5.1)$$

gde je " N_f " ukupan odbroj impulsa unutar energetskih vrhova, " S " je koncentracija radionuklida u zemljištu (pCi/g ili mCi/km^2), " N_o " je ukupan odbroj impulsa unutar energetskih vrhova pri γ -zračenju koje se emituje direktno ispod detektora, a ispred prozora, " Φ " je kolimisani γ -fluks ($\text{fotona}/(\text{cm}^2/\text{s})$) 1 m iznad zemljišta. " N_f/N_o " predstavlja odnos odbroja impulsa unutar fotovrhova pri različitim uzajamnim položajima izvora i detektora i odbroja impulsa unutar vrhova kada se izvor nalazi direktno ispod detektora. Kod ovakvih detektora je prozor okrenut prema površini zemljišta, znači, vertikalno naniže.

S obzirom na cilindričnu simetriju detektora, " N_f/N_o " se računa na sledeći način :

$$\frac{N_f}{N_o} = \frac{\int_0^{\frac{\pi}{2}} R(\theta) \frac{d\Phi}{d\theta} d\theta}{\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\Phi}{d\theta} d\theta} \quad (5.2)$$

gde je "R(θ)" uglovno zavisna promenljiva (relativan odborj zavistan od θ) detektora determinisanog za tačkasti izvor, a " $d\Phi/d\theta$ " je diferencijal kolinisanog γ -fluksa 1 m iznad zemljišta. Efikasnost odbroja impulsa unutar foto-vrha za detektor " N_o/Φ " računata je iz merenja izvršenog pri položaju absolutno kalibriranog tačkastog izvora direktno ispod detektora, čime je obezbedena paralelnost zraka γ -zračenja koji ostvaruju incident u detektoru. Kolinisani γ -fluks 1 m iznad zemljišta, pri stalnoj koncentraciji izvora, " Φ/S " računa se po šematskom modelu na slici :



Sl. 5.1. Šematski prikaz položaja detektora pri "IN SITU" merenjima

Sa šeme se vidi da se detektor nalazi na visini "h" iznad granične površine između dve sredine čiji su linearni atenuacioni koeficijenti " μ_v " i " μ_z " i gustine " ρ_v " i " ρ_z ", koji indiciraju karakteristike vazduha i zemljišta u ovom razmatranju.

Koncentracije detektovanih izvora su u eksponencijalnoj zavisnosti od dubine zemljišta :

$$S(x) = S_0 \exp \left[-\frac{\alpha}{\rho_z} x \rho_z \right] \quad (5.3)$$

gde je "S(x)" aktivnost radionuklida po jediničnoj zapremini na dubini "x" u zemljištu, " S_0 " je odgovarajuća aktivnost pri površinskoj koncentraciji radionuklida, a " α " je recipročna vrednost relaksacione dužine. Distribucija je konvencionalno okarakterisana sa dubinskom raspodelom parametara " α/ρ_z ". Ukupna koncentracija izvora po jediničnoj površini " S_A " se predstavlja kao :

$$S_A = \int_0^\infty S(x) dx = \frac{S_0}{\alpha} \quad (5.4)$$

Ukupni kolumnisani fluks " Φ " od monoenergetskih γ -emitera je dat na sledeći način :

$$\Phi = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_{\frac{h}{\cos(\Theta)}}^\infty \frac{S_0}{4\pi R^2} \exp \left[-\frac{\alpha}{\rho_z} \left(R \cos(\Theta) - h \right) \rho_z \right] \cdot$$

$$\cdot \exp \left[-\frac{\frac{\mu_v}{\rho_v} h \rho_v}{\cos(\Theta)} - \frac{\mu_z}{\rho_z} \left(R - \frac{h}{\cos(\Theta)} \right) \rho_z \right] 2\pi R^2 \sin(\Theta) dR d\Theta \quad (5.5)$$

gdje je "R" rastojanje od detektora do izvora, a " Θ " je ugao između vertikale i R-vektora.

Predhodni izraz se može napisati i na sledeći način :

$$\Phi = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_{\frac{h}{\cos(\Theta)}}^{\infty} \frac{s_o \exp \left[-\alpha \left(R \cos(\Theta) - h \right) \right]}{4\pi R^2} \exp \left[-\frac{\mu_v h}{\cos(\Theta)} - \right. \\ \left. - \mu_z \left(R - \frac{h}{\cos(\Theta)} \right) \right] 2\pi R^2 \sin(\Theta) dR d\Theta \quad (5.6)$$

odnosno :

$$\Phi = \frac{s_o}{2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \exp \left[-\frac{\mu_v h}{\cos(\Theta)} \right] \sin(\Theta) \int_{\frac{h}{\cos(\Theta)}}^{\infty} \exp \left[-\alpha \left(R \cos(\Theta) - \right. \\ \left. - h \right) - \mu_z \left(R - \frac{h}{\cos(\Theta)} \right) \right] dR d\Theta \quad (5.7)$$

$$\Phi = \frac{s_o}{2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \exp \left[-\frac{\mu_v h}{\cos(\Theta)} \right] \sin(\Theta) \int_{\frac{h}{\cos(\Theta)}}^{\infty} \exp \left[- \left(\alpha \cos(\Theta) + \right. \right. \\ \left. \left. + \mu_z \right) R + \left(\alpha + \frac{\mu_z}{\cos(\Theta)} \right) h \right] dR d\Theta \quad (5.8)$$

[zvršićemo integraciju po "R" znajući da je :

$$\int \exp [ax + b] dx = a^{-1} \exp [ax + b]$$

radi rešavanja poslednjeg integrala u jednačini :

$$\left[\frac{\exp \left[- \left(\alpha \cos(\theta) + \mu_z \right) R + \left(\alpha + \frac{\mu_z}{\cos(\theta)} \right) h \right]}{- \left(\alpha \cos(\theta) + \mu_z \right)} \right] \Bigg|_{\frac{h}{\cos(\theta)}}^{\infty} =$$

$$= \frac{\exp \left[- \left(\alpha \cos(\theta) + \mu_z \right) \frac{h}{\cos(\theta)} + \left(\alpha + \frac{\mu_z}{\cos(\theta)} \right) h \right]}{\alpha \cos(\theta) + \mu_z} =$$

$$= \frac{1}{\alpha \cos(\theta) + \mu_z}$$

Ubacivanjem ovog rešenja u zadatu jednačinu dobijamo :

$$\Phi = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\phi}{d\theta} d\theta \quad (5.9)$$

$$\text{gde je : } \frac{d\phi}{d\theta} = \frac{s_o \sin(\theta) \exp \left[- \frac{\mu_v h}{\cos(\theta)} \right]}{2 \left(\alpha \cos(\theta) + \mu_z \right)}$$

Ako izvršimo smenu promenljivih na sledeći način :

$$u = \cos(\theta) \quad du = - \sin(\theta) d\theta$$

dobijamo :

$$\Phi = \frac{S_0}{2} \int_{\mu_z}^{\infty} \frac{\exp\left[-\frac{\mu_v h}{u}\right]}{\alpha u + \mu_z} du \quad (5.10)$$

Promenljive se dalje zamjenjuju sa :

$$v = \frac{\mu_v h}{u} \quad dv = -\frac{\mu_v h}{u^2} du$$

pa dobijamo :

$$\begin{aligned} \Phi &= \frac{S_0}{2} \frac{\mu_v h}{\mu_v h} \int_{\mu_z}^{\infty} \frac{\exp(-v)}{\left[\frac{\alpha \mu_v h}{v} + \mu_z\right] v^2} dv = \\ &= \frac{S_0}{2} \frac{\mu_v h}{\mu_v h} \int_{\mu_z}^{\infty} \exp(-v) \left[\frac{1}{\alpha \mu_v h v} - \frac{1}{\alpha \mu_v h \left(\frac{\alpha \mu_v h}{\mu_z} + v\right)} \right] = \\ &= \frac{S_0}{2\alpha} \int_{\mu_z}^{\infty} \frac{\exp(-v)}{v} dv - \frac{S_0}{2\alpha} \int_{\mu_z}^{\infty} \frac{\exp(-v)}{v + \frac{\alpha \mu_v h}{\mu_z}} dv \quad (5.11) \end{aligned}$$

simenom :

$$x = v + \frac{\alpha \mu_v h}{\mu_z} \quad dx = dv$$

u poslednjem integralu dobijamo :

$$\Phi = \frac{S_0}{2\alpha} \int_{\mu_z}^{\infty} \frac{\exp(-v)}{v} dv - \frac{S_0}{2\alpha} \exp\left(\alpha h \frac{\mu_v}{\mu_z}\right) \int_{\mu_v h + \frac{\mu_v \alpha h}{\mu_z}}^{\infty} \frac{\exp(-x)}{x} dx$$

Sa predstavljanjem eksponencijalnog integrala n-tog reda definisanog na sledeći način :

$$E_n(t) = t^{n-1} \int_t^{\infty} \frac{\exp(-y)}{y^n} dy \quad (5.12)$$

možemo se vratiti u jednačinu za Φ :

$$\Phi = \frac{S_o}{2\alpha} \left[E_1\left(\mu_v h\right) - \exp\left(-\frac{\alpha h \mu_v}{\mu_z}\right) E_1\left(\mu_v h + \frac{\alpha h \mu_v}{\mu_z}\right) \right]$$

ili :

$$\Phi = \frac{S_A}{2} \left\{ E_1\left(\frac{\mu_v}{\rho_v} h \rho_v\right) - \exp\left[-\frac{\alpha}{\rho_z} h \rho_v - \frac{\frac{\mu_v}{\rho_v}}{\frac{\mu_z}{\rho_z}}\right] E_1\left[\frac{\mu_v}{\rho_v} h \rho_v + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{\alpha}{\rho_z} h \rho_v - \frac{\frac{\mu_v}{\rho_v}}{\frac{\mu_z}{\rho_z}}\right] \right\} \quad (5.13)$$

gde je "E₁(t)" eksponencijalni integral prvog reda. U slučaju ravanske (površinske) raspodele izvora dopušta se da $\alpha/\rho_z \rightarrow \infty$. Tada je diferencijal fluksa po uglu " Θ " :

$$\frac{d\Phi}{d\Theta} = \frac{S_A}{2} \operatorname{tg}(\Theta) \exp\left[-\frac{\mu_v}{\rho_v} \frac{h \rho_v}{\cos(\Theta)}\right]$$

ili :

$$\frac{d\Phi}{d\Theta} = \frac{S_o}{2\alpha} \operatorname{tg}(\Theta) \exp\left[-\frac{\mu_v h}{\cos(\Theta)}\right]$$

da se fluks dobija integracijom po "θ" :

$$\Phi = \frac{S_o}{2\alpha} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \operatorname{tg}(\theta) \exp\left(-\frac{\mu_v h}{\cos(\theta)}\right) d\theta$$

Korišćenjem smene :

$$u = \frac{\mu_v h}{\cos(\theta)} ; \quad du = \mu_v h \frac{\sin(\theta)}{\cos^2(\theta)} d\theta = u \operatorname{tg}(\theta) d\theta$$

dobijamo :

$$\Phi = \frac{S_o}{2\alpha} \int_{\frac{\mu_v h}{2}}^{\infty} \frac{\exp(-u)}{u} du = \frac{S_o}{2\alpha} E_1\left(\frac{\mu_v h}{2}\right)$$

ili :

$$\Phi = \frac{S_A}{2} E_1\left(\frac{\mu_v h \rho_v}{\rho_z}\right)$$

Homogena raspodela izvora se opisuje sa : $\frac{\alpha}{\rho_z} = 0$. Na taj način iz osnovne formule za " $\frac{d\Phi}{d\theta}$ " dobijamo :

$$\frac{d\Phi}{d\theta} = \frac{\frac{S_o}{2} \sin(\theta) \exp\left[-\frac{\mu_v h \rho_v}{\rho_z} \frac{\cos(\theta)}{\cos^2(\theta)}\right]}{2 \frac{\mu_z}{\rho_z} \rho_z}$$

ili :

$$\frac{d\Phi}{d\theta} = \frac{S_o}{2\mu_z} \sin(\theta) \exp\left[-\frac{\mu_v h}{\cos(\theta)}\right]$$

Fluks se dobija integracijom :

$$\Phi = \frac{S_0}{2\mu_z} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin(\Theta) \exp\left[-\frac{\mu_v h}{\cos(\Theta)}\right] d\Theta \quad (5.14)$$

uvrštavanjem smene u dati izraz :

$$u = \frac{\mu_v h}{\cos(\Theta)} \quad du = \mu_v h \frac{\sin(\Theta)}{\cos^2(\Theta)} d\Theta = u^2 \frac{\sin(\Theta)}{\mu_v h} d\Theta$$

dobijamo ukupni fluks :

$$\Phi = \frac{S_0}{2\mu_z} \mu_v h \int_{\frac{\mu_v h}{2}}^{\infty} \frac{\exp(-u)}{u^2} du = \frac{S_0}{2\mu_z} E_2\left(\frac{\mu_v h}{2}\right) \quad (5.15)$$

ili :

$$\Phi = \frac{\frac{S_0}{\rho_z}}{\frac{2\mu_z}{\rho_z}} E_2\left(\frac{\mu_v h \rho_v}{\rho_z}\right) \quad (5.16)$$

gde je "E₂(t)" eksponencijalni integral drugog reda, "S₀" predstavlja aktivnost po jediničnoj zapremini i može se predstaviti kao aktivnost po jediničnoj težini : "S", kada se "S₀" podeli sa datom gustinom zemljišta : (S=S₀/ρ_z), tada je :

$$\Phi = \frac{\frac{S}{2\mu_z}}{\frac{\rho_z}{\rho_z}} E_2\left(\frac{\mu_z h \rho_v}{\rho_z}\right) \quad (5.17)$$

i ovo važi u slučaju kada "Φ" ne zavisi od gustine zemljišta. Izračunate "Φ/S" i "Φ/S_A" se daju kao promenljive masenih atenuacionih koeficijenata. Promenljive "μ_v/ρ_v" se određuju pri temperaturi 20°C i pritisku 760 mmHg, a promenljive "μ_z/ρ_z" se određuju u zavisnosti od kompozicionog sastava zemljišta.

Eksponencijalni integrali se izračunavaju uz pomoć kompjutera kao numerički integrali relacija "dΦ/dΘ" i kvantitativni rezultati se, za date osnovne podatke predstavljaju tablično.

Kao što sam već naveo celokupni proračun dat u ovom poglavlju se odnosi na rad sa vertikalnim koaksijalnim sa jedne strane zatvorenim detektorom. Međutim, ispitivanja koja sam vršio bila su izvedena na horizontalnom koaksijalnom sa jedne strane zatvorenom detektoru i navedeni proračun bi bio znatno složeniji, mada principijelno isti, ako bi bio primenjen na ovaj detektor, pri ispitivanju γ -radijacije koja potiče iz zemljišta.

6. EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE ANIZOTROPIJE EFIKASNOSTI KOAKSIJALNOG Ge DETEKTORA - MODEL 7600s1S

Osnovni zadaci ovog eksperimenta su :

- a) snimanje spektara radioaktivnog izvora pri njegovim različitim položajima u odnosu na geometrijski centar detektorskog elementa ali pri jednakim udaljenostima;
- b) prebacivanje snimljenih spektara pomoću programa SAMPO sa višekanalnog analizatora u kompjutersku memoriju tj. na "hard disk";
- c) prebacivanje snimljenih spektara sa "hard diska" na disketu;
- d) zapisivanje i obrada osnovnih podataka dobijenih sa višekanalnog analizatora prilikom merenja;
- e) tabično i grafičko predstavljanje rezultata koji pokazuju anizotropiju efikasnosti ispitivanog detektora u odnosu na niskoenergetsko γ -zračenje izvora ^{152}Eu .

Pri pristupu problemu kako izmeriti efikasnost detektora pri različitim uzajamnim položajima radioaktivnog izvora i detektora ustanovili smo da bi najbolje bilo ispitati sfernu raspodelu efikasnosti u odnosu na geometrijski centar kristala u detektoru. U tom smislu sam izmerio sve spoljne dimenzije detektora. Iz izmerenih dimenzija sam nacrtao principijelu šemu detektorske glave i na osnovu datih podataka od proizvođača detektora odredio položaj detektorskog elementa i njegov centar. U odnosu na dati centar kristala odredio sam dimenziju unutrašnjeg prečnika kružnog prstena, na koji bi se postavljao radioaktivni izvor, tako da se mogu vršiti merenja sa istim " ρ " (poluprečnikom) i pod uglom 180° u odnosu na prozor detektora. Ustanovio sam da bi minimalni prečnik kružnog prstena morao, pod datim uslovima iznositi 800 mm.

Prsten sam napravio od ivice debljine 20 mm. Za ovaj

materijal sam se opredelio zbog lakše manipulacije prilikom izvođenja eksperimenta i zbog toga što ne sadrži u sebi (bar ne u izraženoj meri) materijale koji bi predstavljali dodatne izvore zračenja.

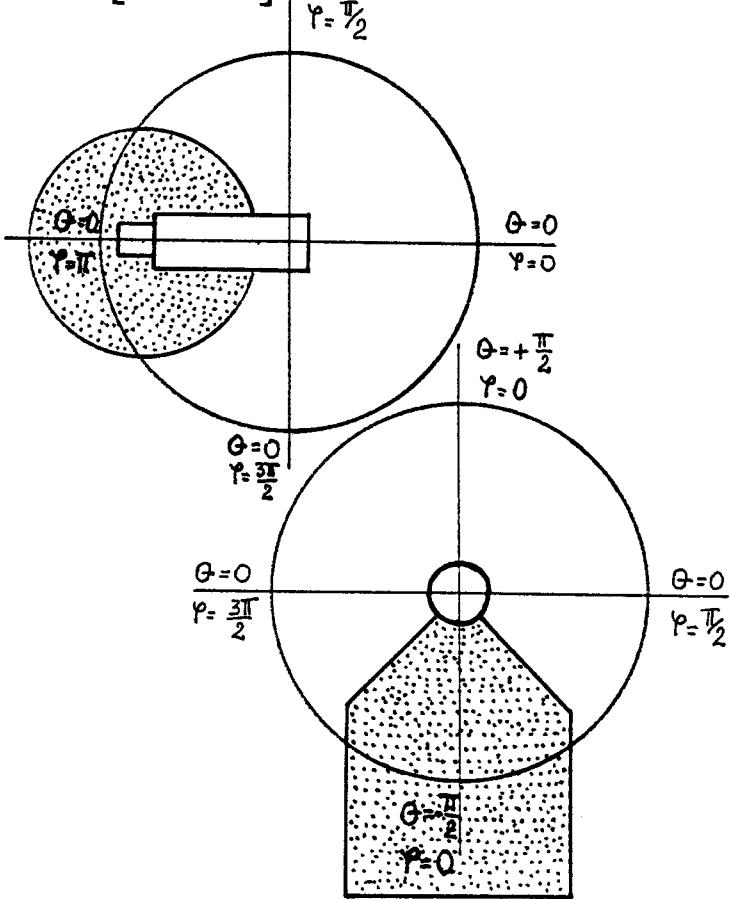
Na prstenu sam označio uglovnu raspodelu i postavio ga na dva nosača fiksiravši ga tako da se njegov centar poklapa sa geometrijskim centrom detektorskog kristala.

Merjenja sam vršio pri tri međusobno uzajamno normalna položaja prstena. Za opisivanje položaja radioaktivnog izvora u odnosu na centar kristala koristio sam se sfernim koordinatnim sistemom :

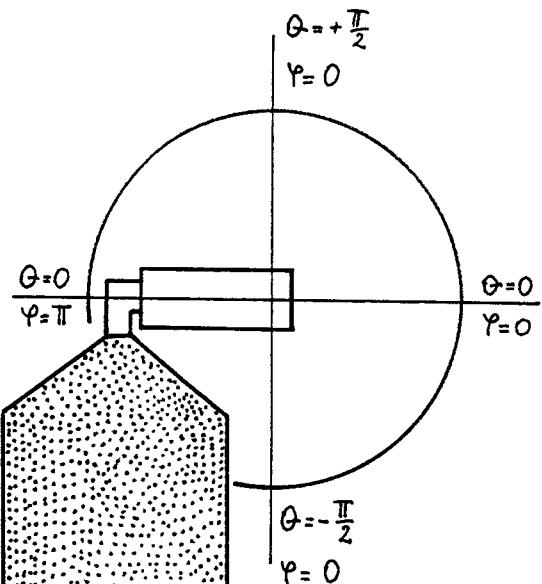
$$\rho = 400 \text{ mm} = \text{const.}$$

$$\Theta \in \left[0, \pm \frac{\pi}{2} \right]$$

$$\varphi \in \left[0, 2\pi \right]$$



početne parametarske vrednosti u odnosu na sredinu detektorskog prozora su :
 $[\rho, \Theta, \varphi] = [400 \text{ mm}, 0^\circ, 0^\circ]$



Sl. 6.1. Crteži detektora sa tri položaja prstena u sfernem koordinatnom sistemu

Pošto smo pripremili i instalirali celokupnu aparaturu, radioaktivni izvor ^{152}Eu čija je izmerena aktivnost dana 11.11.1988. bila $230(5)$ kBq) smo postavili u položaj $[\rho, \Theta, \phi] = [400 \text{ mm}, 0^\circ, 0^\circ]$ i u vremenskom periodu $t=500$ s pomoću višekanalnog analizatora snimili spektar.

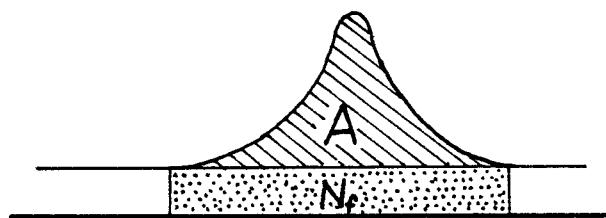
Višekanalni analizator primljene pojačane impulse sortira po visini i tada oni daju spektar. U spektru, svakoj monoenergetskoj grupi čestica odgovara jedna spektralna linija. Intenzitet spektralne linije predstavlja broj čestica koje se u jedinici vremena registruju u domenu oblika spektralne linije. Pri snimanju spektra potrebno je merni dijapazon energije podeliti na određen broj kanala. U svakom kanalu meri se broj čestica za određeno vreme. Višekanalni analizator prikazuje spektar tako što na ordinatu nanosi broj impulsa, a na apscisu broj kanala.

Na spektru smo uočili karakteristične linije na odgovarajućim energijama i izvršili njihovo markiranje. Markiranje na višekanalnom analizatoru smo vršili tako što smo vizuelno (na ekranu) odredili maksimume foto-vrhova karakterističnih linija i ubacili u memoriju na kojoj se energiji oni nalaze; potom smo ustanovili sa leve i desne strane krajeve linija i sa obe strane dodali po četiri kanala i krajnje energijske vrednosti ubacili u memoriju višekanalnog analizatora.

Energije vrhova karakterističnih linija spektra i energetski intervali u kojima su za date linije sa višekanalnog analizatora uzimani (zapisivani) osnovni podaci eksperimenta dati su u tabeli:

ENERGIJA VRHA LINIJE [keV]	ENERGETSKI INTERVAL [keV]
45.4	42.3 do 48.7
121.8	118.2 do 125.1
244.7	241.2 do 248.0
344.7	341.1 do 348.0
443.9	440.5 do 447.4
778.9	775.1 do 782.4
964.0	960.7 do 967.6
1112.0	1108.7 do 1115.5
1408.0	1403.5 do 1413.3

Pošto dobijeni foto-vrhovi na spektru predstavljaju rezultat interakcije u detektoru u kojima je stvoren par elektron-šupljina, broj impulsa pod ovim vrhovima predstavlja broj detektovanih fotona. Višekanalni analizator vrši analizu dobijenog spektra i to tako što izračunava broj fotona po foto-vrhu, tj. površinu foto-vrha iznad linije fona i taj podatak, tj. detektovanu aktivnost, daje kao brojnu vrednost čiji je simbol "A". S obzirom na zadati broj kanala za svaku spektralnu liniju višekanalni analizator takođe izračunava ukupan odbroj ispod foto-vrha (uzimajući u obzir i površinu ispod linije fona) i taj podatak daje sa simbolom "I".



$$A + N_f = N_p \equiv I \quad (6.1)$$

$$A = N_p - N_f \quad (6.2)$$

S obzirom, da sam u eksperimentu određivao efikasnost detektora koja se definiše kao količnik detektovane i ukupne aktivnosti radioaktivnog izvora, za svaku liniju spektra sam očitavao vrednosti za "A" i unosio ih u unapred pripremljene tablice.

$$\epsilon = \frac{A}{A(E_\gamma)} \quad (6.3)$$

Takođe sam očitavao za svaku liniju i vrednost za "I" i unosio ih u date tablice, pošto mi je taj podatak omogućavao da odredim grešku za "A" tj. " ΔA " :

$$\Delta A = \sqrt{N_p + N_f} = \sqrt{I+I+A} = \sqrt{2I - A} \quad (6.4)$$

Veličina " ΔA " je bila neophodna prilikom izračunavanja greške za efikasnost detekcije :

$$\Delta \epsilon = \frac{A}{ACE_{\gamma}} \sqrt{\left(\frac{\Delta A}{A} \right)^2 + \left(\frac{\Delta a_0}{a_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta P_{\gamma}}{P_{\gamma}} \right)^2} \quad (6.5)$$

pri čemu je :

$$ACE_{\gamma} = a_0 P_{\gamma} t \quad (6.6)$$

ACE_{γ} - je brzina emisije γ -kvanata energije " E_{γ} ", pomnožena sa vremenom "t" za koje je izmereno "A".

a_0 - je aktivnost izvora ^{152}Eu dana 11.11.1988.

P_{γ} - je doprinos koji otpada na energiju " E_{γ} ". To je broj emitovanih γ -kvanata po raspodu. Brojne vrednosti " P_{γ} " za određene energije date su u tablicama u prilogu.

Pošto bih u tabele upisao vrednosti za "A" i "I" za datih devet foto-vrhova pri položaju izvora zadatim sa parametrima (ρ, θ, ϕ), dati spektar sam prebacio (presnimio) pomoću programa SAMPO na "hard disk" kompjutera, a potom na disketu. Naredna snimanja spektara sam ponavljaо po istoj proceduri pošto bih promenio položaj izvora na prstenu.

Vrednosti za A, I, ΔA nisam uneo u konačne tablice zbog racionalizacije prostora, a i inače velikog broja podataka.

Iz tablica efikasnosti γ -detekcije rezultate sam predstavio u polarnim dijagramima. Na osnovu njih se može vizuelno ustanoviti oblik anizotropije efikasnosti ispitivanog detektora u tri uzajamno normalne ravni.

Tačke na graficima koje nisu tamne su dobijene na osnovu simetrije, s obzirom da u tim položajima sa $\rho=400$ mm nisam mogao vršiti merenja. Naime, prilikom merenja detektor se nalazio u, sa jedne strane otvorenoj, zaštitnoj komori od spoljne radijacije. Tako da je gornji zid komore onemogućio merenje na tim pozicijama.

7. ZAKLJUČAK

Dobijeni rezultati, na osnovu eksperimenta, predstavljaju efikasnost "ε" ispitivanog detektora na karakterističnim energijama γ -zračenja za kalibracioni izvor ^{152}Eu i u funkciji su uglova položaja " Θ " i " φ " izvora i detektora pri konstantnom rastojanju $\rho=400$ mm. Rezultati najočitije prati geometriju izrade detektorskog elementa. Naime, aktivna zapremina ispred P-kora je najveća i u njoj postoji najveća verovatnoća detekcije upadnog γ -zračenja. Ta visoka efikasnost detekcije odnosi se na γ -zračenja koja su poticala od izvora pri položajima pod uglovima od 0° do $\pm 90^\circ$ u odnosu na prozor detektora. Pri položajima izvora na većim uglovima naglo dolazi do pada efikasnosti detekcije zbog smanjenja aktivne zapremine koju "vidi" izvor u detektoru, ali i zbog povećane atenuacije γ -zračenja od strane konstrukcionih delova detektora. Pored navedenih razloga, na smanjenu efikasnost detekcije uticale su i tzv. mrtve zone kristala, koje su nastale još u procesu njegove proizvodnje.

Na osnovu dobijenih rezultata takođe se može zaključiti da je efikasnost detektora u svim pravcima bolja za γ -zračenja energije od 120 keV do 450 keV, dok za niže i više energije naglo opada.

Greške koje sam dobio diferenciranjem izraza za efikasnost i koje su u tabelama date u zagradi pored rezultata, imaju vrednosti koje su zavisne od položaja izvora i detektora, i vrlo malo procentualno variraju, pri datim rezultatima, u odnosu na energije γ -zračenja. Pri položaju izvora naspram detektorskog prozora i pri uglovima do $\pm 90^\circ$ u odnosu na taj položaj, pa čak i pri većim uglovima, tj. do $\pm 105^\circ$ procentualno, greške efikasnosti detekcije variraju od 2 do 4 %. Kod većih uglova, u odnosu na opisani položaj izvora i detektora, efikasnost detekcije rapidno opada a vrednosti grešaka rastu, da bi pod uglom 180° dostigle svoj maksimum koji iznosi i preko 100 % u odnosu na rezultat. Međutim, odnosi dobijenih rezultata efikasnosti detekcije i njihovih grešaka su takvi da greške, uglavnom, imaju vrednosti unutar eksperimentalnih tačaka na graficima, što je na njima i prikazano za neki proizvoljni ugao položaja izvora i detektora.

Eksperimentalne greške, koje su nastale usled nemogućnosti najtačnijeg centriranja položaja izvora u odnosu na geometrijski centar kristala u detektoru mogu se proceniti na 2 do 3 %. Do procenjene vrednosti ove greške sam došao na osnovu razmatranja geometrijske postavke celokupnog sistema u eksperimentu.

Ovaj, kao i serija drugih eksperimenata sa drugim radioaktivnim izvorima, mogli bi biti od značaja prilikom upotrebe detektora za ispitivanja većih kontaminisanih površina ili prostorija.

U petom poglavlju pod naslovom "KORIŠĆENJE Ge DETEKTORA U "IN SITU" SPEKTROMETRIJI" sam naveo proračun koji se koristi za dobijanje fundamentalnih parametara na osnovu merenja fluksa γ -radijacije koja potiče od radionuklida u zemljištu, i zavisi od njihovog rasporeda i koncentracije. Iz proračuna se vidi da bitnu ulogu u ovakvim merenjima ima efikasnost detekcije γ -zračenja, kao svojstvena osobina detektora, i da ona zavisi od uzajamnog položaja izvora i detektora. Razmatranje je vršeno za koaksijalni i zatvoren Ge detektor čiji je prozor postavljen vertikalno naniže u pravcu normale na površinu zemljišta. Zbog toga se proračun i mogao vršiti samo za uglovna odstupanja " Θ " u odnosu na datu normalu, pošto je detektorski element u svim pravcima u odnosu na nju simetričan, a analogno tome i njegova efikasnost detekcije sledi tu simetriju.

Ovakva merenja bi se mogla vršiti i pomoću našeg detektora koji ima istu geometriju izrade, osim što je njegov prozor usmeren u pravcu koji je paralelan na površinu zemljišta. Međutim, tada bi proračun bio nešto složeniji, pošto bi uglovna odstupanja zavisila od dva ugla " Θ " i " φ ", koji bi bili povezani unutar sfernog koordinatnog sistema. Pri takvim merenjima, rezultati eksperimenta koji bi prikazivali anizotropiju efikasnosti dator detektora bili bi primarni.

LITERATURA

.00mm $a_0 = 230(5)$ kBq izvor: 152 Eu 11.11.1988.

500 s $\Theta = 0^\circ$

45,4 keV $P = 0.111(3)$ $E = 121.8$ keV $R = 0.284(6)$

$\Psi [^\circ]$	$\mathcal{E} \cdot 10^{-3}$	$\varphi [^\circ]$	$\mathcal{E} \cdot 10^{-3}$
0	0.3204(139)	0	0.9762(254)
15	0.3038(134)	15	0.8578(267)
30	0.2396(115)	30	0.9324(289)
45	0.1844(102)	45	1.0046(311)
60	0.1646(97)	60	1.0216(316)
75	0.1772(104)	75	0.9948(308)
90	0.2146(113)	90	0.9916(308)
105	0.1982(109)	105	0.9946(309)
120	0.1532(97)	120	0.9816(305)
135	0.0850(77)	135	0.8692(271)
150	0.0438(69)	150	0.6830(215)
165	0.0150(55)	165	0.3274(109)
180	>>>	180	0.0058(25)
195	0.0046(54)	195	0.2770(94)
210	0.0184(65)	210	0.6028(191)
225	0.0712(75)	225	0.8234(257)
240	0.1432(94)	240	0.9404(292)
255	0.1640(100)	255	0.9608(299)
270	0.1956(107)	270	0.9686(301)
285	0.1648(99)	285	0.9728(302)
300	0.1450(93)	300	0.9854(306)
315	0.1620(96)	315	0.9758(303)
330	0.2122(109)	330	0.9168(284)
345	0.2956(132)	345	0.8710(271)

-00mm	$a_0 = 230(5)$ kBq	izvor: ^{152}Eu	11.11.1988.
500 s	$\Theta = 0^\circ$		
244.7 keV	$P = 0.0751(15)$	$E = 344.3$ keV	$R = 0.266(5)$ keV
$\Psi [^\circ]$	$\epsilon \cdot 10^{-3}$	$\Psi [^\circ]$	$\epsilon \cdot 10^{-3}$
0	0.5930(206)	0.	0.4474(135)
15	0.6100(211)	15	0.4162(139)
30	0.6346(219)	30	0.4792(144)
45	0.6760(231)	45	0.5050(152)
60	0.7104(241)	60	0.5242(157)
75	0.7112(241)	75	0.5264(158)
90	0.7228(246)	90	0.5266(158)
105	0.7138(244)	105	0.5412(162)
120	0.7242(246)	120	0.5278(158)
135	0.6394(222)	135	0.4852(146)
150	0.5528(197)	150	0.4172(127)
165	0.3304(135)	165	0.2652(83)
180	0.0156(52)	180	0.0148(11)
195	0.2866(123)	195	0.2454(77)
210	0.5020(184)	210	0.3926(119)
225	0.6306(219)	225	0.4730(142)
240	0.6768(233)	240	0.5132(154)
255	0.6912(238)	255	0.5264(158)
270	0.6942(239)	270	0.5298(159)
285	0.7146(243)	285	0.5320(159)
300	0.6892(235)	300	0.5180(155)
315	0.6662(229)	315	0.5040(151)
330	0.6444(221)	330	0.4784(144)
345	0.6134(212)	345	0.4620(139)

400mm $\beta_0 = 230(5) \text{ kBq}$ izvor: ^{152}Eu 11.11.1988.

500 s $\Theta = 0^\circ$

443.9 keV $\tau = 0.0280(6)$ $E = 778.9 \text{ keV}$ $F = 0.1298(25)$

$\Psi [^\circ]$	$\mathcal{E} \cdot 10^{-3}$	$\Psi [^\circ]$	$\mathcal{E} \cdot 10^{-3}$
0	0.4000(198)	0	0.2310(81)
15	0.3858(195)	15	0.2400(84)
30	0.4510(212)	30	0.2446(85)
45	0.4330(207)	45	0.2466(85)
60	0.4742(220)	60	0.2556(88)
75	0.4572(214)	75	0.2524(88)
90	0.4646(219)	90	0.2682(92)
105	0.4518(220)	105	0.2598(89)
120	0.4602(219)	120	0.2594(90)
135	0.4218(207)	135	0.2464(86)
150	0.3696(196)	150	0.2304(81)
165	0.2724(159)	165	0.1622(61)
180	0.0162(56)	180	0.0134(15)
195	0.2196(147)	195	0.1452(57)
210	0.3590(191)	210	0.2118(76)
225	0.4302(209)	225	0.2416(84)
240	0.4382(214)	240	0.2576(89)
255	0.4384(213)	255	0.2618(90)
270	0.4686(219)	270	0.2636(90)
285	0.4608(218)	285	0.2566(89)
300	0.4378(212)	300	0.2462(85)
315	0.4478(213)	315	0.2506(87)
330	0.4122(202)	330	0.2428(84)
345	0.3996(200)	345	0.2346(82)

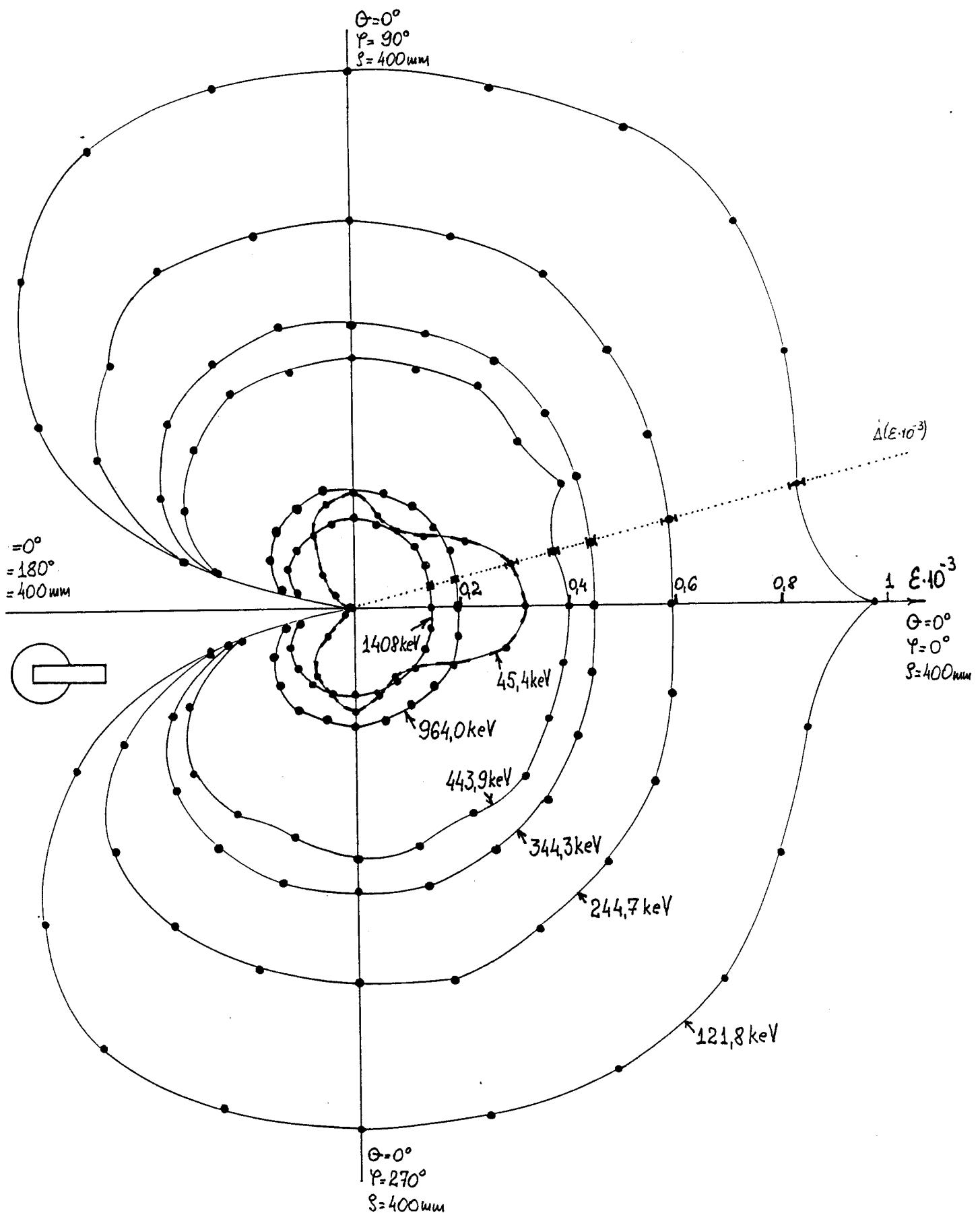
100mm $a_0 = 230(5) \text{ kBq}$ izvor: ^{152}Eu 11.11.1988.

500 s $\theta = 0^\circ$

964.0 keV $P = 0.145(3)$ $E = 1112.0 \text{ keV}$ $P = 0.136(3)$

$\varphi [^\circ]$	$\mathcal{E} \cdot 10^{-3}$	$\varphi [^\circ]$	$\mathcal{E} \cdot 10^{-3}$
0	0.1962(59)	0	0.1706(64)
15	0.1954(70)	15	0.1716(65)
30	0.2070(73)	30	0.1798(67)
45	0.2084(74)	45	0.1868(69)
60	0.2198(77)	60	0.1860(70)
75	0.2182(77)	75	0.1932(72)
90	0.2154(76)	90	0.1914(71)
105	0.2248(79)	105	0.1908(71)
120	0.2164(76)	120	0.1952(72)
135	0.2088(74)	135	0.1768(67)
150	0.1834(66)	150	0.1714(65)
165	0.1428(54)	165	0.1290(51)
180	0.0156(13)	180	0.0168(13)
195	0.1328(51)	195	0.1210(49)
210	0.1784(65)	210	0.1630(62)
225	0.2014(72)	225	0.1810(68)
240	0.2198(77)	240	0.1914(71)
255	0.2148(76)	255	0.1902(71)
270	0.2182(76)	270	0.1894(70)
285	0.2132(76)	285	0.1922(71)
300	0.2080(74)	300	0.1894(70)
315	0.2046(73)	315	0.1786(67)
330	0.2124(75)	330	0.1826(68)
345	0.1990(71)	345	0.1738(65)

400mm	$a_0 = 230(5) \text{ kBq}$	izvor: ^{152}Eu	11.11.1988.
500 s	$\Theta = 0^\circ$		
1408.0 keV	$P = 0.208(4)$		
$\varphi [^\circ]$	$\mathcal{E} \cdot 10^{-3}$		
0	0.1434(48)		
15	0.1442(49)		
30	0.1518(51)		
45	0.1600(53)		
60	0.1590(53)		
75	0.1620(54)		
90	0.1664(54)		
105	0.1630(54)		
120	0.1628(54)		
135	0.1528(51)		
150	0.1492(50)		
165	0.1122(39)		
180	0.0156(9)		
195	0.1078(38)		
210	0.1378(47)		
225	0.1524(51)		
240	0.1574(53)		
255	0.1584(53)		
270	0.1582(53)		
285	0.1610(54)		
300	0.1540(52)		
315	0.1574(53)		
330	0.1502(50)		
345	0.1454(49)		



-00mm

 $a_0 = 230(5)$ kBqizvor: ^{152}Eu

11.11.1988.

500 s

+5.4 keV

 $P = 0.111(3)$ $E = 121.8$ keV $P = 1.284(6)$

$\varphi [^\circ]$	$\psi [^\circ]$	$\epsilon \cdot 10^{-3}$	$\theta [^\circ]$	$\varphi [^\circ]$	$\psi [^\circ]$	$\epsilon \cdot 10^{-3}$
+90	90	0.2088(113)	+90	90	0.9506(295)	
+75	90	0.1902(109)	+75	90	0.9551(305)	
+60	90	0.1863(108)	+60	90	0.9596(301)	
+45	90	0.1799(106)	+45	90	0.9503(307)	
+30	90	0.2279(122)	+30	90	0.9525(309)	
+15	90	0.2182(119)	+15	90	0.9548(303)	
0	90	0.2114(117)	0	90	0.9543(303)	
-15	90	0.2396(122)	-15	90	0.9509(298)	
-30	90	0.2136(115)	-30	90	0.9402(292)	
-45	90	0.2110(114)	-45	90	0.9594(298)	
-60	90	0.1979(111)	-60	90	0.9526(299)	
-75	90	0.2125(114)	-75	90	0.9580(300)	
-90	0	0.2888(113)	-90	0	0.9506(295)	
-75	270	0.1902(109)	-75	270	0.9551(305)	
-60	270	0.1863(108)	-60	270	0.9596(301)	
-45	270	0.1799(106)	-45	270	0.9503(307)	
-30	270	0.1863(109)	-30	270	0.9526(310)	
-15	270	0.1900(112)	-15	270	1.0202(316)	
0	270	0.2236(120)	0	270	1.0370(322)	
+15	270	0.2428(126)	+15	270	1.0480(325)	
+30	270	0.2483(129)	+30	270	1.0480(325)	
+45	270	0.2110(114)	+45	270	0.9594(298)	
+60	270	0.1979(111)	+60	270	0.9526(299)	
+75	270	0.2125(114)	+75	270	0.9580(300)	

400mm

 $a_0 = 230(5)$ kBqizvor: ^{152}Eu

11.11.1988.

500 s

244.7 keV $P = 0.0751(15)$ $E = 344.3$ keV $F = 0.266(5)$

$\varphi [^\circ]$	$\psi [^\circ]$	$\mathcal{E} \cdot 10^{-3}$	$\theta [^\circ]$	$\psi [^\circ]$	$\mathcal{E} \cdot 10^{-3}$
+90	90	0.7197(244)	+90	90	0.5312(159)
+75	90	0.7124(243)	+75	90	0.5343(160)
+60	90	0.7335(249)	+60	90	0.5495(164)
+45	90	0.7428(252)	+45	90	0.5529(165)
+30	90	0.7233(250)	+30	90	0.5455(163)
+15	90	0.7373(253)	+15	90	0.5376(161)
0	90	0.7248(249)	0	90	0.5347(160)
-15	90	0.6850(238)	-15	90	0.5246(157)
-30	90	0.6910(238)	-30	90	0.5158(155)
-45	90	0.7076(242)	-45	90	0.5220(156)
-60	90	0.6957(237)	-60	90	0.5296(159)
-75	90	0.7186(244)	-75	90	0.5280(158)
-90	0	0.7197(244)	-90	0	0.5312(159)
-75	270	0.7124(243)	-75	270	0.5343(160)
-60	270	0.7335(249)	-60	270	0.5495(164)
-45	270	0.7428(252)	-45	270	0.5529(165)
-30	270	0.7666(259)	-30	270	0.5575(167)
-15	270	0.7656(261)	-15	270	0.5656(169)
0	270	0.7757(259)	0	270	0.5780(173)
+15	270	0.7797(265)	+15	270	0.5859(175)
+30	270	0.7576(261)	+30	270	0.5591(167)
+45	270	0.7076(242)	+45	270	0.5220(156)
+60	270	0.6957(237)	+60	270	0.5296(159)
+75	270	0.7186(244)	+75	270	0.5280(158)

400mm

 $a_0 = 230(5)$ kBqizvor: ^{152}Eu

11.11.1988.

500 s

443.9 keV $P = 0.0280(6)$ $E = 778.9$ keV $P = 0.1298(25)$

$\varphi [^\circ]$	$\psi [^\circ]$	$\epsilon \cdot 10^{-3}$	$\theta [^\circ]$	$\varphi [^\circ]$	$\epsilon \cdot 10^{-3}$
+90	90	0.4627(220)	+90	90	0.2562(89)
+75	90	0.4755(226)	+75	90	0.2544(89)
+60	90	0.4770(226)	+60	90	0.2654(91)
+45	90	0.5040(231)	+45	90	0.2694(92)
+30	90	0.5093(236)	+30	90	0.2642(91)
+15	90	0.4599(221)	+15	90	0.2567(89)
0	90	0.4581(221)	0	90	0.2561(88)
-15	90	0.4683(223)	-15	90	0.2546(88)
-30	90	0.4429(215)	-30	90	0.2483(86)
-45	90	0.4606(219)	-45	90	0.2508(87)
-60	90	0.4562(217)	-60	90	0.2607(90)
-75	90	0.4621(221)	-75	90	0.2607(90)
-90	0	0.4627(220)	-90	0	0.2562(89)
-75	270	0.4755(226)	-75	270	0.2544(89)
-60	270	0.4770(226)	-60	270	0.2654(91)
-45	270	0.5040(231)	-45	270	0.2694(92)
-30	270	0.4944(232)	-30	270	0.2716(93)
-15	270	0.4786(231)	-15	270	0.2790(95)
0	270	0.4801(227)	0	270	0.2648(91)
+15	270	0.5338(241)	+15	270	0.2844(96)
+30	270	0.4891(236)	+30	270	0.2788(95)
+45	270	0.4606(219)	+45	270	0.2508(87)
+60	270	0.4562(217)	+60	270	0.2607(90)
+75	270	0.4621(221)	+75	270	0.2607(90)

00mm

 $\alpha_0 = 230(5)$ kBqizvor: ^{152}Eu

11.11.1988.

500 s

264.0 keV $P = 0.145(3)$ $E = 1112.0$ keV $P = 0.136(3)$

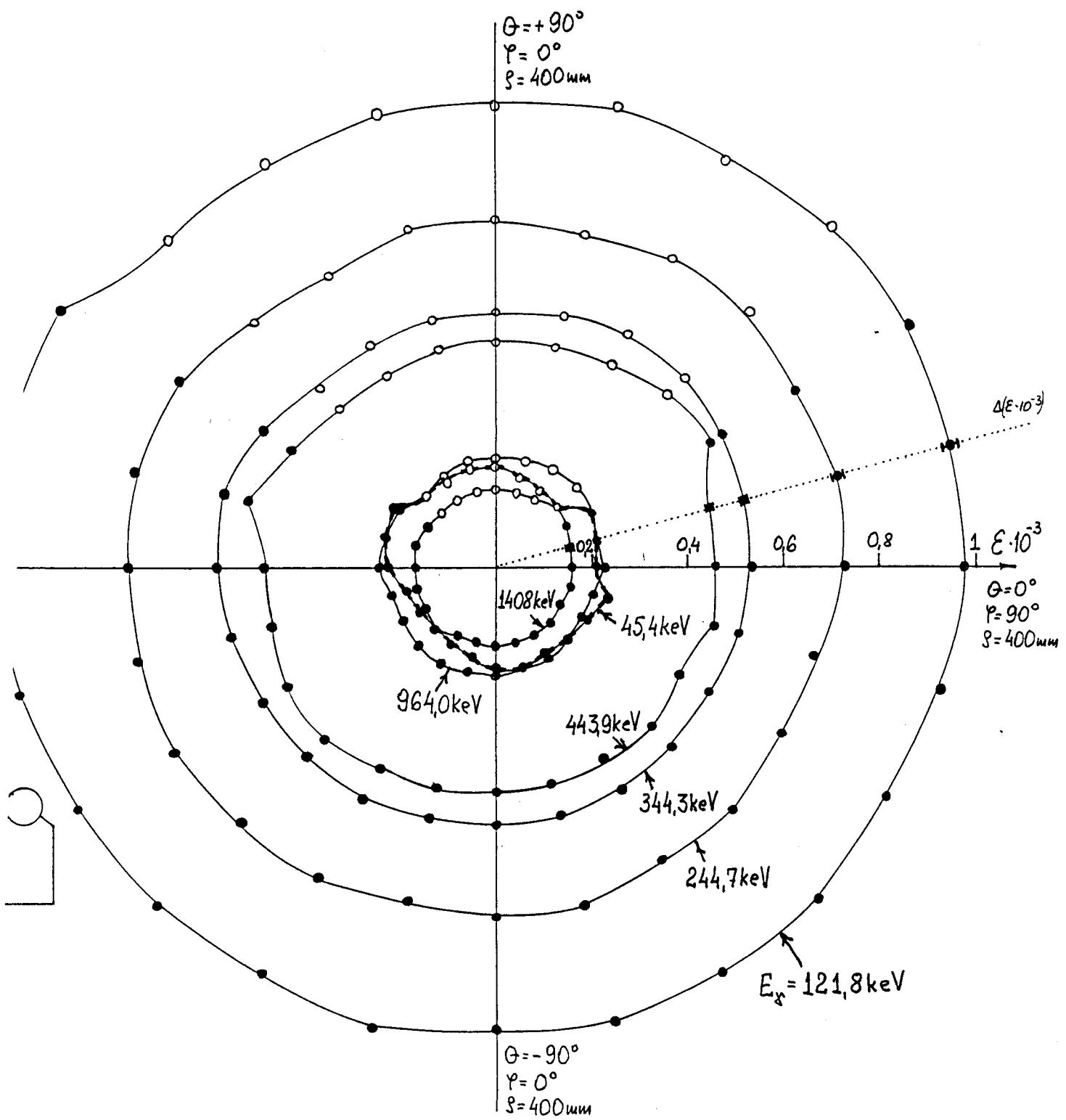
$\phi [^\circ]$	$\psi [^\circ]$	$\mathcal{E} \cdot 10^{-3}$	$\theta [^\circ]$	$\varphi [^\circ]$	$\mathcal{E} \cdot 10^{-3}$
+90	90	0.2217(78)	+90	90	0.1924(71)
+75	90	0.2248(78)	+75	90	0.2055(75)
+60	90	0.2319(81)	+60	90	0.2030(74)
+45	90	0.2280(80)	+45	90	0.2003(74)
+30	90	0.2270(79)	+30	90	0.2006(74)
+15	90	0.2169(76)	+15	90	0.1992(73)
0	90	0.2211(78)	0	90	0.1882(70)
-15	90	0.2111(75)	-15	90	0.1897(71)
-30	90	0.2083(74)	-30	90	0.1908(71)
-45	90	0.2124(75)	-45	90	0.1813(68)
-60	90	0.2135(75)	-60	90	0.1884(70)
-75	90	0.2204(77)	-75	90	0.1978(73)
-90	0	0.2217(78)	-90	0	0.1924(71)
-75	270	0.2248(78)	-75	270	0.2055(75)
-60	270	0.2319(81)	-60	270	0.2030(74)
-45	270	0.2280(80)	-45	270	0.2003(74)
-30	270	0.2265(79)	-30	270	0.2033(75)
-15	270	0.2269(79)	-15	270	0.2086(76)
0	270	0.2380(82)	0	270	0.2101(77)
+15	270	0.2358(82)	+15	270	0.2083(76)
+30	270	0.2332(81)	+30	270	0.2042(75)
+45	270	0.2124(75)	+45	270	0.1813(68)
+60	270	0.2135(75)	+60	270	0.1884(70)
+75	270	0.2204(77)	+75	270	0.1978(73)

00mm $a_0 = 230(5)$ kBq izvor: Eu 11.11.1988.

500 s

1408.0 keV $P = 0.208(4)$

$[^\circ]$	$\Psi [^\circ]$	$\epsilon \cdot 10^{-3}$
+90	90	0.1610(54)
+75	90	0.1589(53)
+60	90	0.1637(54)
+45	90	0.1733(57)
+30	90	0.1714(57)
+15	90	0.1599(53)
0	90	0.1616(54)
-15	90	0.1624(54)
-30	90	0.1526(51)
-45	90	0.1577(53)
-60	90	0.1575(53)
-75	90	0.1606(53)
-90	0	0.1610(54)
-75	270	0.1589(53)
-60	270	0.1637(54)
-45	270	0.1733(57)
-30	270	0.1648(55)
-15	270	0.1690(56)
0	270	0.1699(56)
+15	270	0.1760(58)
+30	270	0.1691(56)
+45	270	0.1577(53)
+60	270	0.1575(53)
+75	270	0.1606(53)



100mm

 $a_0 = 230(5)$ kBqizvor: ^{152}Eu

11.11.1988.

500 s

45.4 keV

 $P = 0.111(3)$ $E = 121.8$ keV $P = 0.284(6)$

$\theta [^\circ]$	$\varphi [^\circ]$	$\epsilon \cdot 10^{-3}$	$\theta [^\circ]$	$\varphi [^\circ]$	$\epsilon \cdot 10^{-3}$
+90	0	0.2088(113)	+90	0	0.9506(295)
+75	0	0.1993(111)	+75	0	0.9926(308)
+60	0	0.1559(99)	+60	0	1.1135(344)
+45	0	0.2104(114)	+45	0	1.0906(337)
+30	0	0.1520(123)	+30	0	1.0076(312)
+15	0	0.3324(145)	+15	0	0.9419(292)
0	0	0.3203(140)	0	0	0.8162(254)
-15	0	0.3058(135)	-15	0	0.8360(260)
-30	0	0.2280(112)	-30	0	0.9146(284)
-45	0	0.2104(114)	-45	0	1.0906(337)
-60	0	0.1559(99)	-60	0	1.1135(344)
-75	0	0.1993(111)	-75	0	0.9926(308)
-90	0	0.2088(113)	-90	0	0.9506(295)
-75	180	0.1810(103)	-75	180	0.9380(291)
-60	180		-60	180	
-45	180		-45	180	
-30	180		-30	180	
-15	180		-15	180	
0	180	0.0.0000(0)	0	180	0.0058(25)
+15	180	0.0035(53)	+15	180	0.2066(74)
+30	180	0.0473(74)	+30	180	0.7390(232)
+45	180		+45	180	
+60	180		+60	180	
+75	180	0.1810(103)	+75	180	0.9380(291)

400mm

 $a_0 = 230(5)$ kBqizvor: ^{152}Eu

11.11.1988.

500 s

244.7 keV $F = 0.0751(15)$ $E = 344.3$ keV $F = 0.266(5)$

$\phi [^\circ]$	$\psi [^\circ]$	$\mathcal{E} \cdot 10^{-3}$	$\theta [^\circ]$	$\psi [^\circ]$	$\mathcal{E} \cdot 10^{-3}$
+90	0	0.7197(244)	+90	0	0.5312(159)
+75	0	0.7285(248)	+75	0	0.5382(161)
+60	0	0.7318(249)	+60	0	0.5561(166)
+45	0	0.7496(253)	+45	0	0.5698(170)
+30	0	0.7244(246)	+30	0	0.5246(157)
+15	0	0.6782(232)	+15	0	0.5081(152)
0	0	0.5931(206)	0	0	0.4473(135)
-15	0	0.5989(207)	-15	0	0.4608(139)
-30	0	0.6445(220)	-30	0	0.4752(143)
-45	0	0.7496(253)	-45	0	0.5698(170)
-60	0	0.7318(249)	-60	0	0.5561(166)
-75	0	0.7285(248)	-75	0	0.5382(161)
-90	0	0.7197(244)	-90	0	0.5312(159)
-75	180	0.7048(239)	-75	180	0.5179(155)
-60	180		-60	180	
-45	180		-45	180	
-30	180		-30	180	
-15	180		-15	180	
0	180	0.0156(52)	0	180	0.0148(11)
+15	180	0.2228(107)	+15	180	0.2013(65)
+30	180	0.5605(202)	+30	180	0.4523(137)
+45	180		+45	180	
+60	180		+60	180	
+75	180	0.7048(239)	+75	180	0.5179(155)

400mm

 $a_0 = 230(5)$ kBqizvor: **152** Eu

11.11.1988.

500 s

443.9 keV $P = 0.0280(6)$ $E = 778.9$ keV $P = 0.1298(25)$

$\varphi [^\circ]$	$\psi [^\circ]$	$\mathcal{E} \cdot 10^{-3}$	$\theta [^\circ]$	$\psi [^\circ]$	$\mathcal{E} \cdot 10^{-3}$
+90	0	0.4627(220)	+90	0	0.2562(89)
+75	0	0.4950(232)	+75	0	0.2611(90)
+60	0	0.4838(227)	+60	0	0.2726(93)
+45	0	0.5003(230)	+45	0	0.2758(94)
+30	0	0.4609(220)	+30	0	0.2540(88)
+15	0	0.4941(225)	+15	0	0.2563(88)
0	0	0.4000(198)	0	0	0.2310(81)
-15	0	0.4062(198)	-15	0	0.2312(81)
-30	0	0.4127(202)	-30	0	0.2363(82)
-45	0	0.5003(230)	-45	0	0.2758(94)
-60	0	0.4838(227)	-60	0	0.2726(93)
-75	0	0.4950(232)	-75	0	0.2611(90)
-90	0	0.4627(220)	-90	0	0.2562(89)
-75	180	0.4609(232)	-75	180	0.2541(88)
-60	180		-60	180	
-45	180		-45	180	
-30	180		-30	180	
-15	180		-15	180	
0	180	0.0161(55)	0	180	0.0135(15)
+15	180	0.1658(128)	+15	180	0.1241(50)
+30	180	0.3873(206)	+30	180	0.2403(84)
+45	180		+45	180	
+60	180		+60	180	
+75	180	0.4609(232)	+75	180	0.2562(88)

400mm

 $a_0 = 230(5)$ kBqizvor: ^{152}Eu

11.11.1988.

500 s

964.0 keV $P = 0.145(3)$ $E = 1112.0$ keV $P = 0.136(3)$

$\chi [^\circ]$	$\gamma [^\circ]$	$\epsilon \cdot 10^{-3}$	$\theta [^\circ]$	$\gamma [^\circ]$	$\epsilon \cdot 10^{-3}$
+90	0	0.2217(78)	+90	0	0.1924(71)
+75	0	0.2140(76)	+75	0	0.1964(72)
+60	0	0.2296(80)	+60	0	0.1922(71)
+45	0	0.2389(83)	+45	0	0.2080(76)
+30	0	0.2123(75)	+30	0	0.1829(69)
+15	0	0.2126(76)	+15	0	0.1788(68)
0	0	0.1963(70)	0	0	0.1707(64)
-15	0	0.1950(70)	-15	0	0.1767(66)
-30	0	0.1914(69)	-30	0	0.1784(67)
-45	0	0.2389(83)	-45	0	0.2080(76)
-60	0	0.2296(80)	-60	0	0.1922(71)
-75	0	0.2140(76)	-75	0	0.1964(72)
-90	0	0.2217(78)	-90	0	0.1924(71)
-75	180	0.2089(74)	-75	180	0.1836(69)
-60	180		-60	180	
-45	180		-45	180	
-30	180		-30	180	
-15	180		-15	180	
0	180	0.0156(13)	0	180	0.0168(13)
+15	180	0.1112(44)	+15	180	0.0994(42)
+30	180	0.1975(70)	+30	180	0.1753(66)
+45	180		+45	180	
+60	180		+60	180	
+75	180	0.2089(74)	+75	180	0.1836(69)

400mm

 $a_0 = 230(5)$ kBqizvor: ^{152}Eu

11.11.1988.

500 s

1408.0 keV $P = 0.208(4)$

$\varphi [^\circ]$	$\Psi [^\circ]$	$\varepsilon \cdot 10^{-3}$
+90	0	0.1610(54)
+75	0	0.1637(54)
+60	0	0.1655(55)
+45	0	0.1694(56)
+30	0	0.1617(54)
+15	0	0.1598(53)
0	0	0.1435(48)
-15	0	0.1464(49)
-30	0	0.1504(50)
-45	0	0.1694(56)
-60	0	0.1655(55)
-75	0	0.1637(54)
-90	0	0.1610(54)
-75	180	0.1595(53)
-60	180	
-45	180	
-30	180	
-15	180	
0	180	0.0156(9)
+15	180	0.0987(35)
+30	180	0.1492(50)
+45	180	
+60	180	
+75	180	0.1595(53)

