

ПРИМЉЕНО 23 ЈАН 2003	
ОРГАНИЗ ЈЕД	Б Р О Ј
0603	9/17

UNIVERZITET U NOVOM SADU  
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
DEPARTMAN ZA FIZIKU

Hansman Jan

**REDUKCIJA FONA PRIMENOM Fe i Pb ZAŠTITE**  
-diplomski rad-

NOVI SAD, januar 2003

*Zahvaljujem se svim zaposlenim u Laboratoriji za Nuklearnu fiziku na podršci i pomoći  
prilikom izrade ovog diplomskog rada.*

## SADRŽAJ

1.Uvod.....	4
2.Gama zraci.....	4
2.1.Izvori gama zraka.....	4
2.2.Spektri gama zraka.....	4
2.3.Analitičko predstavljanje spektralnih komponenti.....	6
3.Energijska kalibracija i kalibracija efikasnosti.....	7
3.1.Kalibracioni izvori.....	7
3.2.Energijska kalibracija.....	7
3.3.Kalibracija efikasnosti.....	7
4.Izvori i komponente fona.....	8
4.1.Radioaktivno okruženje.....	9
4.2.Kosmički zraci.....	12
5.Gama spektrometrija niskih aktivnosti.....	14
5.1.Optimalizacija vremena merenja.....	15
5.2.Položaj izvora gama zraka.....	15
5.3.Smanjivanje fona u gama spektrometriji.....	16
6.Niskofonski Ge spektrometri.....	17
6.1.Niskofonski gama spektrometri sa zaštitom od Pb.....	17
6.2.Niskofonski gama spektrometri sa zaštitom od Fe.....	17
6.3.Niskofonski spektrometri sa aktivnom zaštitom.....	18
6.4.Niskofonski spektrometar sa aktivnom zaštitom u DFNS.....	19
7.Ge detektori u DFNS.....	19
7.1.HPGe detektor.....	19
7.2.Gamma-X HPGe detektor.....	19
8.Uređaji za obradu signala u spektrometarskom sistemu.....	20
9.Gama linije u spektrima fona.....	21
9.1.HPGe bez zaštite.....	21
9.2.HPGe u Fe zaštiti.....	26
9.3.GmX bez zaštite.....	27
9.4.GmX u Fe zaštiti.....	32
9.5.GmX u Pb zaštiti.....	35
9.6.GmX u Pb+Cu+Azot zaštiti.....	37
10.Zaključak.....	39
Reference.....	40

## **1.Uvod**

Merenja u nuklearnoj fizici su značajna u fundamentalnim istraživanjima a takođe i u ekologiji, medicinskoj fizici, zaštiti životne sredine i drugim primjenjenim oblastima. Zbog toga je značajno detaljno poznavati karakteristike mernog sistema.

Tokom istorije nuklearne fizike razvijen je niz različitih detektora. Rad svih detektora se zasniva na istom principu: predaji dela ili celokupne energije detektoru gde se ona pretvara u oblik dostupan ljudskom opažanju. Elektromagnetsko zračenje u aktivnoj zapremini detektora stvara nanelektrisane čestice. Nanelektrisane čestice predaju svoju energiju materiji pri direktnom sudaru sa atomskim elektronima i tako eksituju ili ionizuju atome. Način na koji dolazi do pretvaranja energije zavisi od vrste detektora i njegove konstrukcije. Električni signal formiran u detektoru se obrađuje odgovarajućom elektronikom.

Glavni materijali za izradu zaštite za niskofonske Ge detektore su Pb i Fe. Oba materijala imaju svoje prednosti u odnosu na onaj drugi materijal [SLIVKA 00].

## **2.Gama zraci**

Gama zraci nastaju pri deeksitaciji pobuđenih nuklearnih stanja u jezgrima atoma. Popunjavanje stanja odnosno njihovo pobuđivanje može se ostvariti putem nuklearnih reakcija i radioaktivnim raspadom jezgra ( $\alpha$ ,  $\beta$  raspad). Radioaktivnim raspadom dolazi do promene rednog broja jezgra. Početno jezgro se naziva jezgro predak a krajnje jezgro potomak. Za radioaktivni izvor  $\gamma$  zraka se obično uzima ime pretka iako  $\gamma$  zraci najčešće nastaju prelazom između različitih stanja u potomku. Jezgro, emisijom  $\gamma$  zraka dolazi do osnovnog stanja koje može biti stabilno ili podložno daljem raspodu.

### **2.1.Izvori gama zraka**

Pod pojmom "izvor" se podrazumeva makroskopska količina materijala koja sadrži atome koji emituju nuklearno i atomske zračenje. Sem atoma emitera tu su uključeni i nosači radioizotopa i materijali matriksa. Izvore delimo u dve kategorije:

- 1) izvori koji sadrže radioaktivni materijal i kontinuirano emituju zračenje;
- 2) izvori koji emituju fotone kada se ozračuju spolja česticama i/ili fotonima;

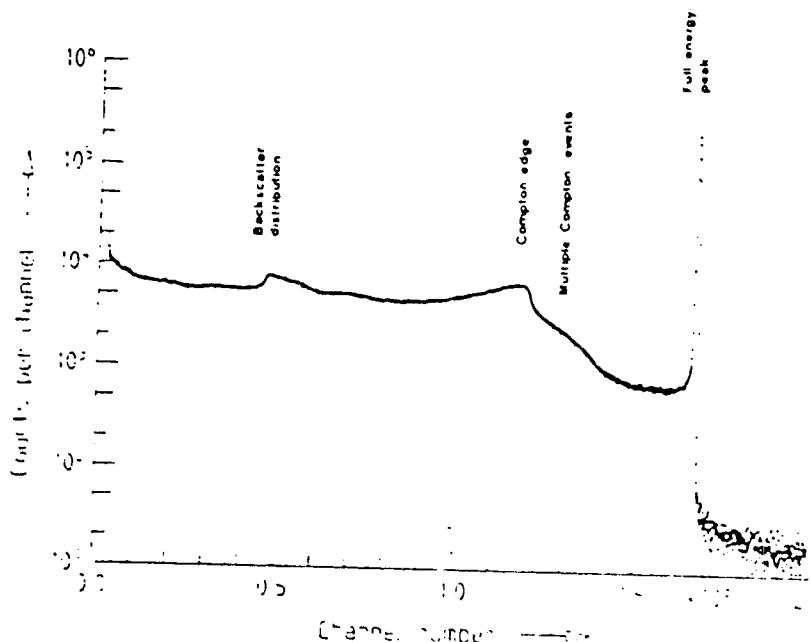
Radioaktivni izvori sadrže radioaktivne atome ili u stabilnom materijalu nosača od istog elementa ili u matriksu od drugih elemenata ili jedinjenja.

Izvori pobuđeni spoljašnjim zračenjem sadrže atome neaktivnog materijala koji nakon dejstva čestica ili fotona emituju  $\gamma$  ili X zrake.

Izvori se prema dimenzijama dele na tačkaste, površinske i prostorne. Strogo govoreći, svi izvori su prostorni i trodimenzionalni, mnogi od njih se mogu tretirati kao tačkasti ili površinski, što zavisi od dimenzija izvora u odnosu na rastojanje izvor-detektor. Pod tačkastim izvorom se podrazumeva izvor čije su dimenzije dovoljno male da je za dati eksperiment efikasnost detekcije ista kao za idealni tačkasti izvor. Površinski izvor je takav izvor da je debeljina je dovoljno mala da efikasnost, uključujući i efekte geometrije i atenuacije, bude ista kao za beskonačno tanak izvor iste veličine.

### **2.2.Spektri $\gamma$ zraka**

Cilj spektrometrijskog merenja je određivanje energije i broja fotona koje emituje izvor, što se koristi za identifikaciju i određivanje aktivnosti radionuklida.



Slika 1.-Spektar  $^{137}\text{Cs}$

Spektroskopija i detekcija  $\gamma$  zračenja pomoću poluprovodničkih detektora se zasniva na tri efekta:

- 1)fotoefekat;
- 2)Komptonov efekat;
- 3)efekat stvaranja parova.

Detekcija je posredna jer elektroni nastali u ovim interakcijama vrše daljnju ionizaciju i ekscitaciju.

Originalni  $\gamma$  spektar radioaktivnog izvora ima diskretan karakter.Zbog statističke prirode nastanka fotona i stvaranja nanelektrisanih čestica.linija u spektru nije oštra već ima karakterističan oblik Gausove krive i naziva se linija fotovrha (pik totalne apsorpcije).Pik totalne apsorpcije nastaje kada upadni  $\gamma$  kvant svu svoju energiju ostavi u detektoru i ponekad čini samo mali deo ukupnog odbroja,ali upravo on daje korisnu informaciju.Ostatak otpada na spektralni kontinuum čije prisustvo ne možemo izbeći.Na osnovu položaja vrha totalne apsorpcije utvrđuje se o kojem radionuklidu se radi (koja  $\gamma$  linija) a na osnovu površine vrha (odbroja signala pod vrhom) se određuje aktivnost radionuklida.

Kod Komptonovog efekta,elastičnim rasejanjem,foton slobodnom elektronu preda energiju od nulte do neke maksimalne:

$$E_e = \frac{E}{1 + \frac{m_0 c^2}{2E}} \quad (1)$$

gde je E energija primarnog fotona a  $m_0 c^2$  energija mirovanja elektrona i na spektru se uočava kao kontinualni fon.

Proizvodnja parova je glavni mehanizam interakcije za  $\gamma$  zrake energije iznad nekoliko MeV.U ovom procesu se u Kulonovom polju jezgra,energija fotona pretvara u par elektron-pozitron.Energija fotona mora biti veća od  $2m_ec^2=1022\text{keV}$  (dvostruka energija koja odgovara masi elektrona u mirovanju).Elektron i pozitron se usporavaju u okolnom materijalu a pozitron na kraju reaguje sa nekim od elektrona,anihilira se .i nastaju dva fotona sa energijama oko 511 keV.Zbog održanja impulsa ova dva fotona se emituju u približno suprotnim pravcima.Zbog Doplerovog efekta,koji nastaje zbog kretanja elektrona na mestu anihilacije,prirodna širina linije fotona je oko 2 keV.

### 2.3.Analitičko predstavljanje spektralnih komponenti

Podaci u oblasti vrha se opisuju sa dve analitičke funkcije:jedna predstavlja spektralni fon (kontinuum) a druga predstavlja vrh.Za opisivanje kontinuma ispod vrha se najčešće koriste analitičke funkcije koje se sastoje iz dve komponente:prva je neki polinom niskog reda za opisivanje doprinosa od fotona viših energija i koja predstavlja osnovu za ceo region ispod vrha a druga komponenta opisuje skokoviti porast na niskoenergetskoj strani spektra.Izrazi za prvu komponentu variraju od konstante do polinoma trećeg reda.Linearna funkcija aproksimira kontinuum dovoljno dobro,osim ako se u posmatranom delu ne nalazi komptonska ivica.Za drugu komponentu je najjednostavnije koristiti prostu stepenastu funkciju sa prekidom na mestu centroide vrha.

U idealnom slučaju vrh totalne apsorpcije bi se analitički mogao predstaviti Gausovom funkcijom:

$$f(x) = Ye^{-\frac{(x-X)^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

gde je Y amplituda,X centroida a  $\sigma$  poluširina na visini  $Y/\sqrt{e}$ .U praksi, vrh ima produžetak,rep na strani niže energije a moguće i na strani više energije,naročito kod velikih brzina brojanja.Zato se oblik vrha često mora opisivati složenim funkcijama.Broj parametara koji figuriše u analitičkom obliku takvih funkcija se kreće i do 9 u slučaju gausijana sa dva eksponencijalno opadajuća repa sa obe strane.Metode prilagođavanja se vrše i za multiplete.Za dublet,funkcija za prilagođavanje je suma dve funkcije identičnog oblika,ali sa različitim vrednostima parametara.Za korektno analiziranje multipleta,obično se i vrhovi i kontinuum moraju predstaviti funkcijama koje su bolje aproksimacije merenih oblika nego što su to jednostavni gausijani.

Površina vrha se može uzeti da je integral odgovarajućeg dela analitičke funkcije.Neto površina vrha koja je od značaja N,dobija se tako što se od ukupne površine A oduzme iznos površine B ispod analitičke funkcije koja opisuje kontinuum:N=A-B.

Računarski programi za obradu spektra moraju sem vrednosti podešavanih parametara.da iskažu i njihove varijancije.Nesigurnost površine gausijana se može izračunati iz varijancije amplitude Y i širine  $\sigma$  i njihove kovarijancije.

Ako se odredi odbroj pod vrhom (površina) N,tada se dobijeni rezultat navodi kao vrednost sa odgovarajućom granicom poverenja:  $N \pm k\sigma$ ,što znači da odbroj leži sa odgovarajućim stepenom poverenja unutar granica  $N-k\sigma$  i  $N+k\sigma$ .Za nivo poverenja od 90% rezultat se predstavlja kao  $N \pm 1.645\sigma$ .Najčešće se koristi jednostruka standardna devijacija  $\sigma$  sa nivoom poverenja od 68.3%.Za jednokanalno brojanje i za slučaj kada se vrh i kontinuum određuju iz istog broja kanala je  $\sigma_n = \sqrt{(N + 2B)}$ .

### **3.Energijska kalibracija i kalibracija efikasnosti**

#### **3.1.Kalibracioni izvori**

Spektrometri se pre merenja energije fotona i brzine emisije moraju kalibrirati.Za kalibraciju energije se mogu upotrebiti svi tipovi izvora fotona dobro poznatih energija.Izvori čija je aktivnost izvedena iz apsolutnih merenja kakva se vrše u laboratorijama za standardizaciju se nazivaju "standardni" izvori.Standardni izvor se uvek koristi kao celina,tako da se aktivnost koju deklariše proizvođač odnosi na ceo izvor.Kalibracioni izvori su najčešće u obliku standardnih rastvora ili u obliku čvrstih kvazi-tačkastih izvora.

#### **3.2.Energijska kalibracija**

Cilj energijske kalibracije je dobijanje veze između pozicija vrhova u spektru i odgovarajućih energija  $\gamma$  zraka,odnosno definisanje korespondencije između kanala i energije.Uputrebom 4096 kanala (polovina memorije) višekanalnog analizatora za snimanje oblasti od 0 do 2 MeV,dobija se energijska kalibracija od oko 0.5 keV po kanalu.

Energijska kalibracija se izvodi na osnovu spektra izvora koji emituje  $\gamma$  zrake sa precizno poznatim energijama i povezivanjem izmerene pozicije vrhova sa odgovarajućim energijama.

Kalibracioni izvori mogu sadržavati jedan ili više radionuklida,ali kalibracione energije treba da pokrivaju ceo interval u kome se koristi spektrometar.Najjednostavnija energijska kalibracija se izvodi snimanjem spektra izvora koji se sastoji iz smeše  $^{152}\text{Eu}$  i  $^{154}\text{Eu}$ .

Najčešće se energija može predstaviti kao linearna funkcija kanala: $E(x) = a + bx$ ,gde je x redni broj kanala a E energija.Nekada je dovoljno da se parametri a i b odrede iz samo dva dobro odabrana vrha.Ako su energije ovih vrhova  $E_1$  i  $E_2$  a pozicije na kanalima  $x_1$  i  $x_2$ , tada je

$$E(x) = E_1 + \frac{E_2 - E_1}{x_2 - x_1} (x - x_1) \quad (3)$$

Razlika između  $E(x)$  i prave energije uglavnom zavisi od odstupanja od linearnosti sistema pojačavač-analizator.Pošto su odstupanja najveća na krajevima kanalnog intervala višekanalnog analizatora,najbolje je izbegavati prvih i poslednjih 10% kanalnog intervala.Odstupanja poznatih energija  $\gamma$  zraka od vrednosti dobijenih po (3) kreću se oko  $\pm 0.2$  kanala.Za starije sisteme mogu postojati i odstupanja izražena većim brojem kanala.Poboljšanje energijske kalibracije se može postići korišćenjem više  $\gamma$  linija poznatih energija.Vrednosti parametara a i b se onda dobijaju metodom najmanjih kvadrata.

Odstupanje kalibrirane od prave energije se može smanjiti za red veličine ako se uzme umesto linearne,da je energija kvadratna funkcija kanala  $E(x) = a + bx + cx^2$ .Vrednosti parametara a,b i c se mogu izračunati iz energija i pozicija najmanje tri vrha,ali se obično odreduju prilagodavanjem funkcije metodom najmanjih kvadrata koristeći skup od 4 ili više vrhova.

#### **3.3.Kalibracija efikasnosti**

Pod eksperimentalnom kalibracijom efikasnosti se podrazumeva kalibracija detektora na efikasnost vrha totalne apsorpcije  $\epsilon$ .Ova efikasnost predstavlja odnos odbroja  $N_M$  pod vrhom, u toku izvesnog vremenskog intervala  $\Delta t$  i ukupnog broja  $\gamma$  kvanata  $N_{u,M}$  date energije što ih je izvor emitovao u istom vremenskom intervalu:

$$\epsilon = \frac{N_M}{N_{u,M}} = \frac{N_M}{A p_\gamma \Delta t} \quad (4).$$

A[Bg] je srednja aktivnost izvora u toku tog intervala vremena :

$$A = \frac{N_{u\Delta t}}{p_\gamma \Delta t} \quad (5)$$

a  $p_\gamma$  je verovatnoća emisije odgovarajućih  $\gamma$  zraka. Srednja brzina brojanja pod vrhom tokom istog intervala vremena  $R$  [1/s] je

$$R = \frac{N_v}{\Delta t} \quad (6)$$

pa je

$$\varepsilon = \frac{R}{Ap_\gamma} \quad (7).$$

Poznate veličine su aktivnost kalibracionog izvora i vrednost  $p_\gamma$  za  $\gamma$  linije koje se koriste prilikom kalibracije efikasnosti, dok se vrednosti  $R$  dobijaju merenjem. Na ovakav način je omogućeno izračunavanje efikasnosti  $\varepsilon$  za različite poznate energije  $\gamma$  zraka koje emituje kalibracioni izvor. Posle toga se konstruiše kalibraciona kriva efikasnosti koja predstavlja grafik zavisnosti efikasnosti od energije.

#### 4. Izvori i komponente fona

Fon se može definisati kao spektar dobijen bez ispitivanog izvora odnosno spektar zračenja koje potiče izvan izvora (fon okoline). Kada se posmatraju  $\gamma$  zraci neke određene energije u spektru, fon se definiše kao spektar dobijen kada bi bilo prisutno svo zračenje osim  $\gamma$  zraka date energije (uključuje efekte  $\gamma$  zraka viših energija i fon okoline). U spektralnoj analizi je uobičajeno da se u fon uključi sve što ne pripada vrhu.

Osnovni izvori fona  $\gamma$  detektora su:

- a) radioaktivna kontaminacija;
- b) kosmički zraci;
- c) električne smetnje.

Brzina brojanja fona potiče od:

- 1) eksterne radioaktivnosti, od materijala izvan glavne zaštite, jer svi gradevinski materijali sadrže primordijalnu radioaktivnost. Ova komponenta se zaštitom od 10 cm Pb ili 20 cm Fe redukuje do beznačajne vrednosti.
- 2) kontaminacije  $\gamma$  emiterima zaštite i materijalima unutar nje. Pb je najvažniji zaštitni materijal zbog svog velikog rednog broja, velike gustine i povoljnih mehaničkih osobina. Nedostatak novoproizvedenog Pb je taj, što ono skoro uvek sadrži znatne količine  $^{210}\text{Pb}$ . Selekcijom minerala i posebnom rafinacijom se može dobiti specijalno niskootaktivno Pb. U niskofonske sisteme postavlja se unutrašnji sloj od starog Pb (iz brodskih olupina ili sa starih krovova). Koncentracija  $^{210}\text{Pb}$  u starom Pb zavisi od vremena prošlog od proizvodnje i od početne koncentracije, tako da staro Pb može imati istu koncentraciju  $^{210}\text{Pb}$  kao i dobro novoproizvedeno Pb. Kvalitet Pb se može odrediti jedino merenjem.

Manji broj niskofonskih sistema (takođe i sistem u DFNS) ima zaštitu od Fe, koje je liveno pre 1952. Fe proizvedeno posle 1952. može sadržati značajne količine antropogenih radionuklida (naročito  $^{60}\text{Co}$ ).

Kao zaštita niskofonskih sistema se koriste i Cu,Al,Hg ,razni plastični materijali (akril,teflon...) i staklo.

Radikontaminacija Cu se može svesti na najmanju meru,pa se Cu koristi za izradu delova detektora i za unutrašnji sloj zaštite.

Al sadrži kontaminaciju uglavnom od serije U,Hg je izgubila na značaju zbog praktičnosti Cu.  
3)radona koji difunduje u šupljine zaštite, i njegovih potomaka;  
4)sekundarnih fotona i elektrona,proizvedenih mionima i protonima u materijalu štita;  
5)neutrona,indukovanih mionima i protonima (uglavnom u zaštiti);  
6)miona (curenje miona u sisteme sa antikosmičkom zaštitom).

#### 4.1.Radioaktivno okruženje

Radionuklidi se prema poreklu dele na 3 kategorije:

1)Primarni radionuklidi,stvoreni nukleosintezom u vreme kada i sva supstanca solarnog sistema.Radioizotopi ove kategorije imaju poluživot uporediv sa starošću Zemlje ( $4.5 \times 10^9$  god) ili duži,a ovde spadaju i kratkoživeći izotopi iz tri radioaktivna niza koja počinju dugoživećim  $^{232}$ Th, $^{235}$ U i  $^{238}$ U.

2)Sekundarni radionuklidi:

2a)Kosmogeni radionuklidi proizvedeni delovanjem kosmičkih zraka na zemaljsku i vanzemaljsku supstanciju.Najvažniji kosmogeni radionuklidi su  $^3$ H i  $^{14}$ C,koji se trajno proizvode kosmičkim zracima u stratosferi.

2b)Antropogeni radionuklidi,koji se proizvode u nuklearnim reaktorima,nuklearnim bombama i akceleratorima.To su produkti fisijske aktivacije i transuranski elementi.

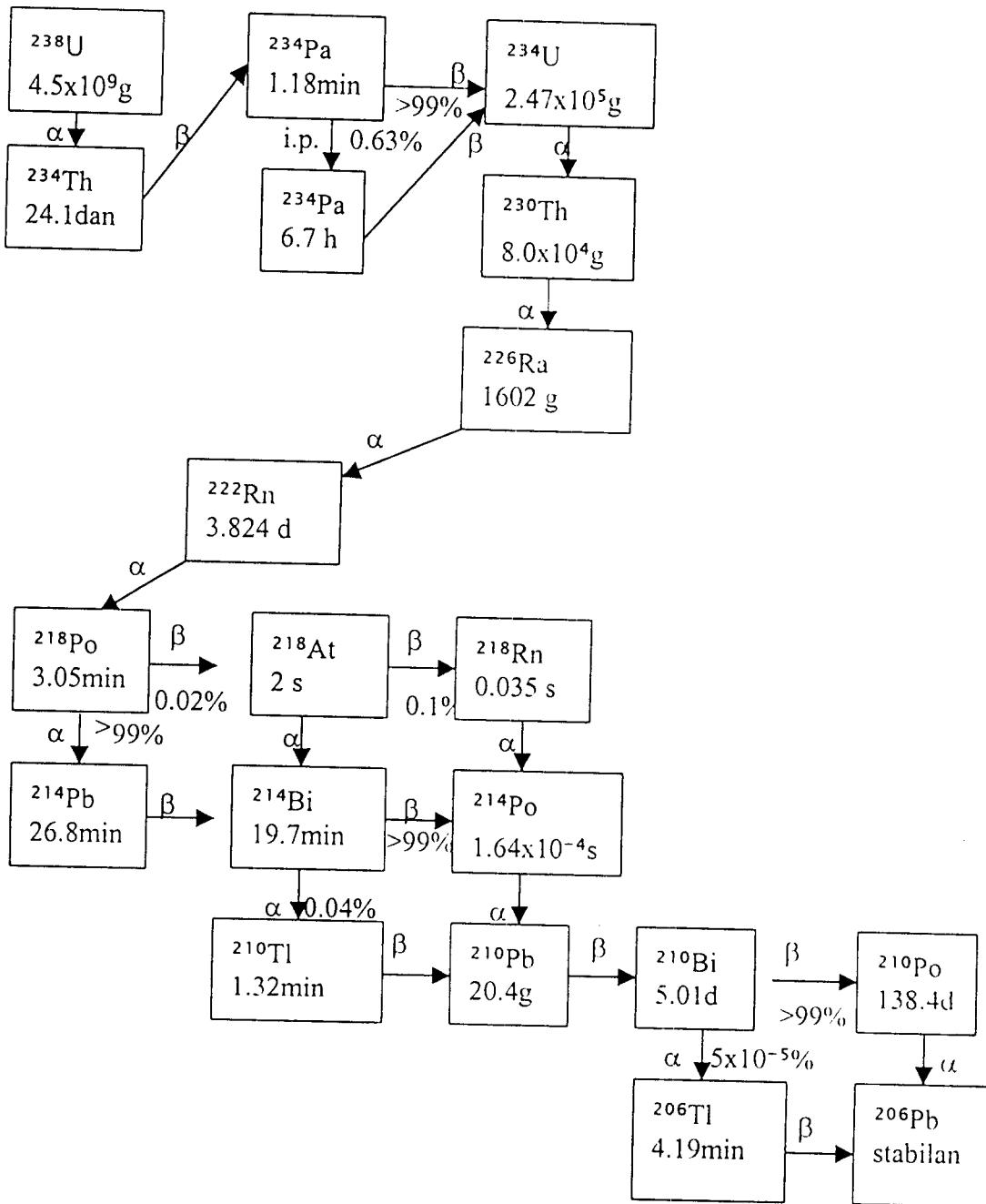
Zračenje radionuklida u  $\gamma$  spektrometriji niskih aktivnosti stvara ometajući doprinos signalu niskofonskog sistema a i ono samo može biti objekt ispitivanja.

Izvor fona može biti eksterna ili interna radioaktivnost.Eksterna radioaktivnost potiče od K,Th i U u materijalima laboratorije (zgrade).Interni radioaktivnost potiče od radionuklida u zaštiti koja opkoljava detektor i od materijala unutar zaštite.uključujući i sam detektor.

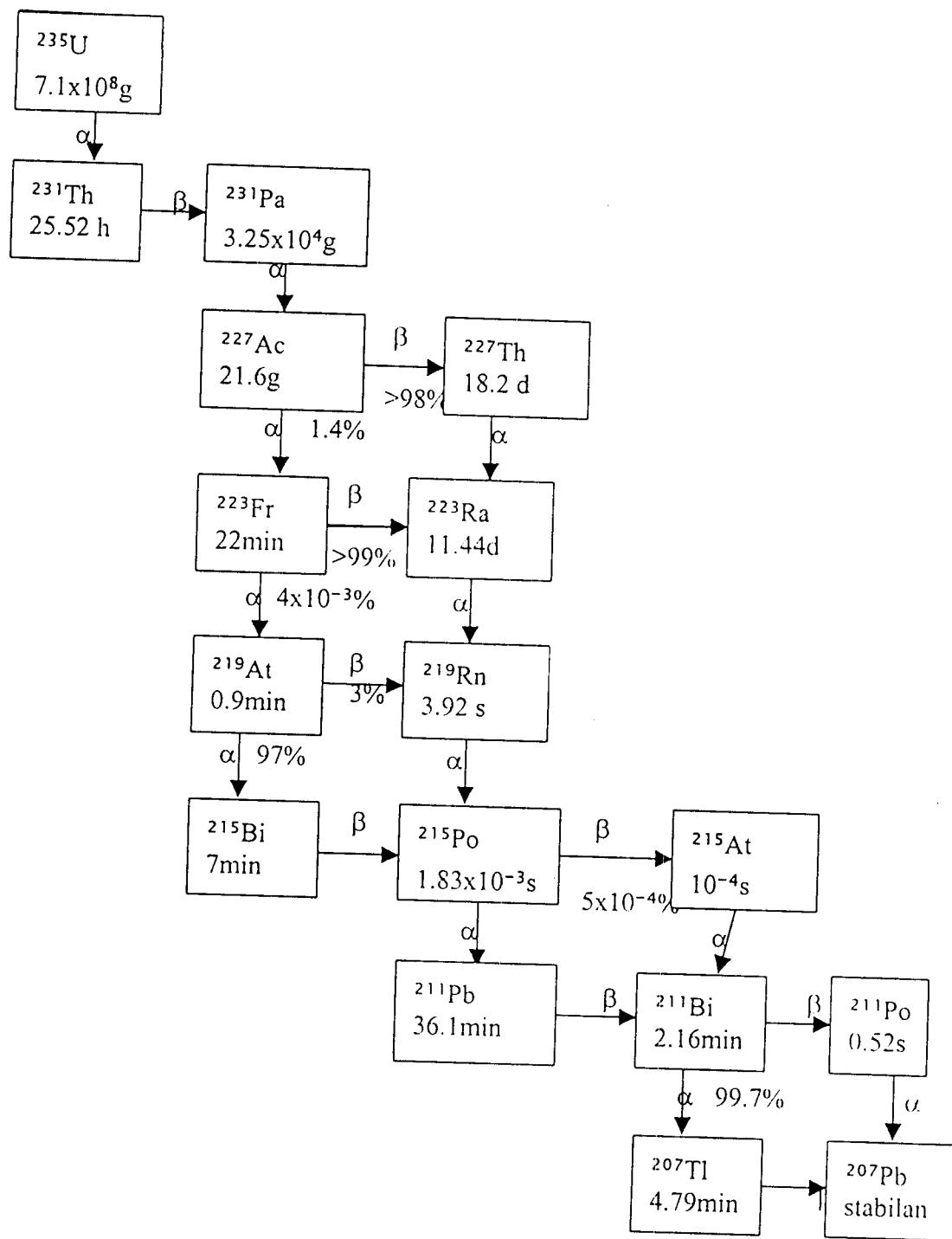
TABELA 1:najčešći radioizotopi

IZOTOP	POLUŽIVOT (god)	SPEC.AKTIVNOST (Bq/kg)	$\gamma$ /raspadu(>50 keV)
$^{40}$ K	$1.25 \times 10^9$	$2.95 \times 10^4$	0.11
$^{232}$ Th	$14.0 \times 10^9$	$4.02 \times 10^6$	2.08
$^{238}$ U	$4.5 \times 10^9$	$12.3 \times 10^6$	1.80

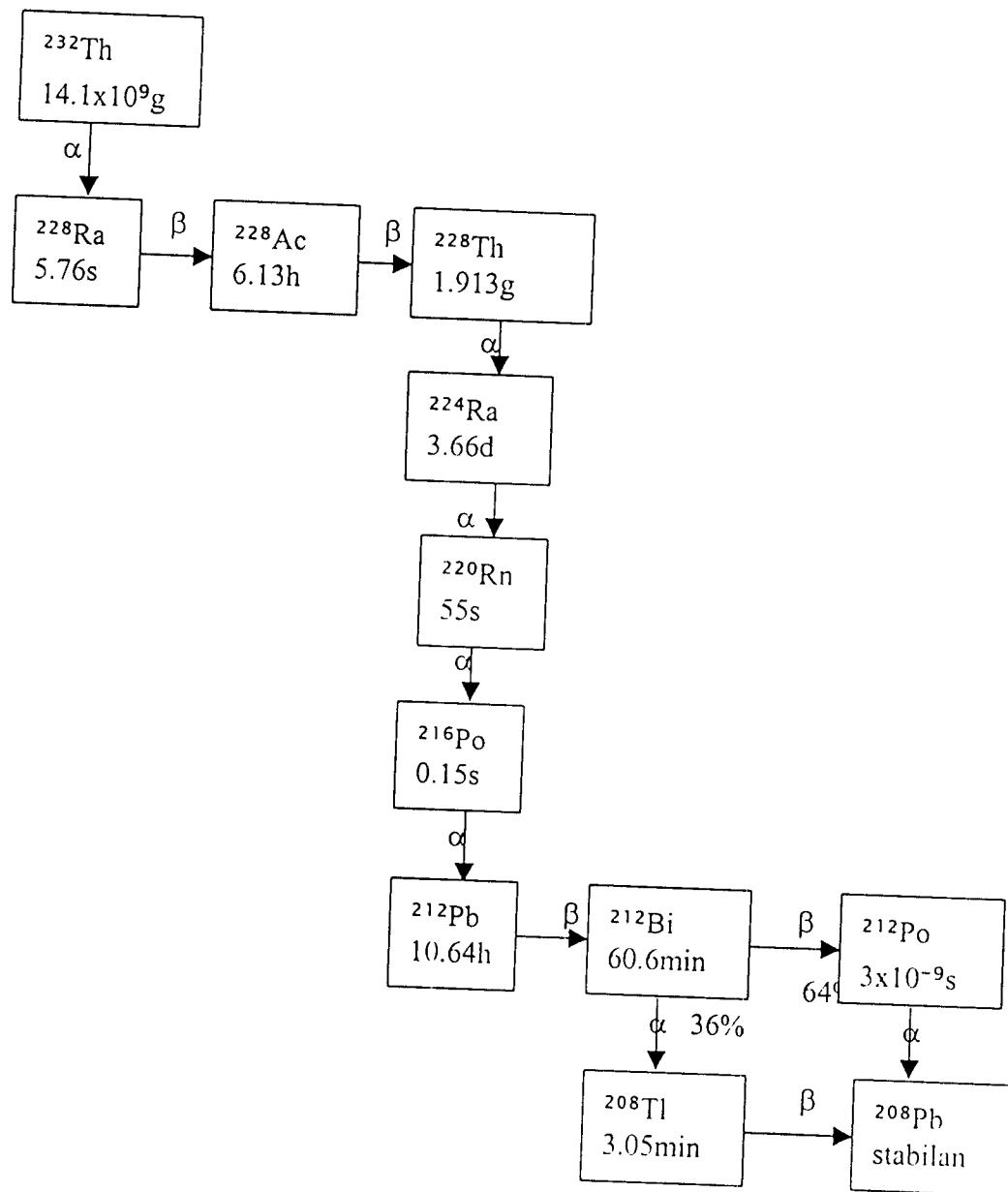
## Uranijum-Radijumov niz



## Uranijum-Aktinijumov niz



## Torijumov niz



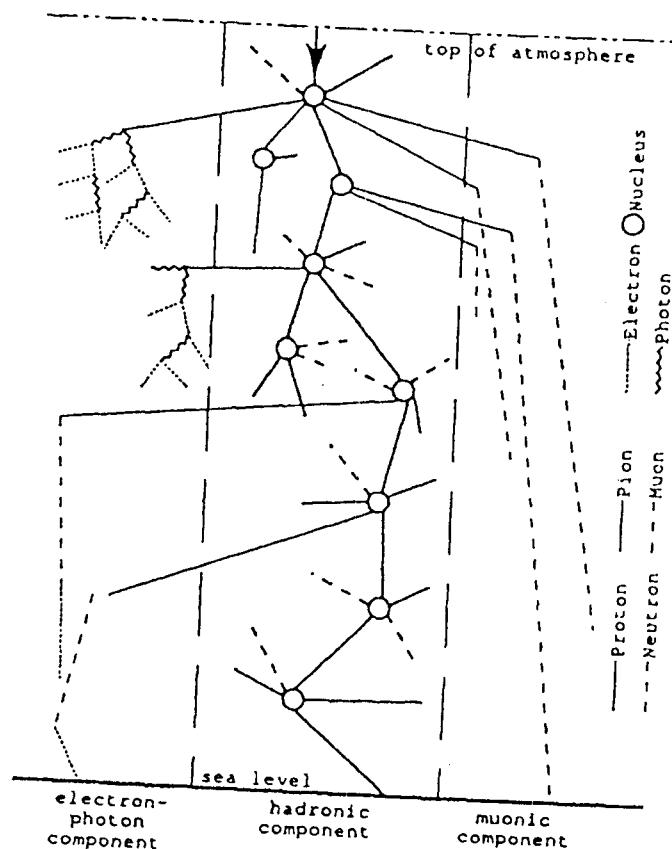
## 4.2.Kosmički zraci

Najvažniji i najteži deo tehnike merenja niskih aktivnosti je potiskivanje doprinosa kosmičkog zračenja fonu osnovnog detektora do najnižeg mogućeg nivoa. Kosmički zraci se mogu svesti na beznačajan nivo smeštanjem mernog sistema duboko pod zemlju (obično se iz ekonomskih razloga to ne radi). Najčešće su laboratorijski na površini (laboratorijski na departmanu za fiziku u Novom Sadu-DFNS), čiju spoljašnju zaštitu čine tavanice i zidovi zgrade ili su plitko ukopane pa imaju apsorbujući sloj od nekoliko metara stena ili zemlje. Ukupni apsorbujući sloj iznad sistema se naziva pokrivni sloj (eng.OVERBURDEN) i izražava se u  $\text{g}/\text{cm}^2$  ili u metrima vodenog ekvivalenta ( $\text{mwe}=100 \text{ g}/\text{cm}^2$ ).

Čestice kosmičkih zraka koje stižu u atmosferu Zemlje su jezgra lakih atoma sa visokom energijom: protoni (86%), jezgra He (12.7%) i teža jezgra (1.3%). Interakcijom kosmičkih zraka sa atmosferom proizvode se sekundarne čestice-čestice formirane u atmosferi i čvrstoj zemlji i  $\gamma$  kvanti, iako ove čestice mogu nastati i u više koraka.

Visokoenergijski protoni, u proseku, u svakom sudaru gube oko polovine svoje energije. Prolaskom kroz atmosferu njihov broj i energija opadaju. Sudarima sa atomskim jezgrima atmosfere (najčešće N i O) dolazi do višestrukih elastičnih i neelastičnih sudara. Mogu se emitovati i protoni, neutroni ili pioni sa energijama od 200 do 500 MeV, pretežno u pravcu upadnog protona. Posle tog, jezgro ostaje u pobuđenom stanju i emituju se dodatni nukleoni sa energijom u širokom spektru, koji ima maksimum na oko 1 MeV i proteže se do iznad 10 MeV. Kada je energija upadnog protona ispod 1 GeV emituju se uglavnom protoni i neutroni a ako je iznad 1 GeV obično je veći broj piona. Osim novonastalih protona, i visokoenergijski neutroni i pioni mogu prouzrokovati istu vrstu sudara, sa sličnom dužinom interakcije (formiraju nukleonski deo kosmičkih zraka i zajednički se zovu hadroni).

Svaki primarni proton proizvede u atmosferi oko 20 neutrona širokog spektra energije. Putanja neutrona u atmosferi je duža od putanje protona, jer oni ne gube energiju na ionizaciju. Neutroni se usporavaju elastičnim i neelastičnim sudarima sa jezgrima u atmosferi, sve dok ne budu zahvaćeni u neko jezgro.



*Slika 2.-Nastajanje i sudbina čestica kosmičkih zraka u atmosferi*

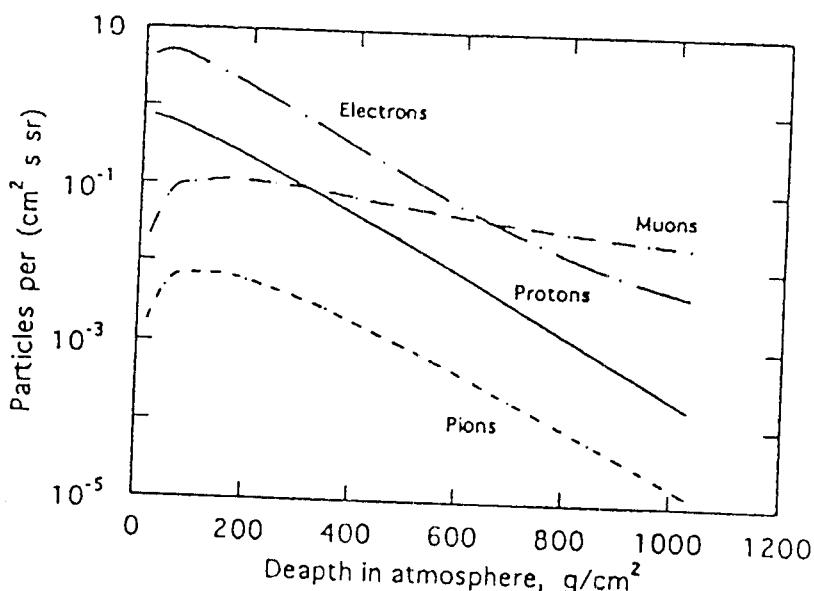
Pioni se proizvode u visokoenergijskim kaskadnim sudarima, sa približno istom verovatnoćom za sve tri vrste piona: pozitivni  $\pi^+$ , negativni  $\pi^-$  i neutralni  $\pi^0$ . Svi su nestabilni sa kratkim srednjim životom  $\tau$ :

$$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu \quad \tau = 2.6 \times 10^{-8} \text{ s}; \quad \pi^0 \rightarrow 2\gamma + \nu \quad \tau = 1.8 \times 10^{-16} \text{ s}.$$

Naelektrisani pioni snažno interaguju sa jezgrima i doprinose proizvodnji miona, čiji pravac kretanja je približno isti kao i kod piona. Mioni su vrlo prodorni (presek za interakciju sa jezgrima je samo  $2 \times 10^{-29} \text{ cm}^{-2}$  -  $20 \text{ }\mu\text{barn}$ ) i gube energiju samo elektromagnetskom interakcijom (ionizacija, ekscitacija, zakočno zračenje, stvaranje parova). Zbog toga je energijski spektar miona skoro isti kao spektar piona od kojih nastaju. Spektar miona se ipak pri prolazu kroz atmosferu modificuje zbog ionizacionih gubitaka, raspada i zahvata suprotno nanelektrisanih miona. Veliki broj miona se u letu raspada na elektron i neutrino.

Elektroni u kosmičkim zracima gube energiju uglavnom zakočnim zračenjem emitujući fotone skoro ravnog spektra koji se proteže od nule do početne energije elektrona  $E_0$ . Srednja dužina  $X_0$ , koju pređe elektron pre emisije fotona se zove radijaciona dužina.

Za fotone visoke energije, najverovatniji proces je proizvodnja parova. Srednja dužina koju pređe foton je slična radijacionoj dužini elektrona. Ponavljanje kombinovanog efekta visokoenergijskih fotona i elektrona proizvodi elektromagnetske pljuskove (kaskade).



Slika 3.-Fluksevi čestica kosmičkih zraka u atmosferi

### 5.Gama spektrometrija niskih aktivnosti

Merjenje niskih aktivnosti se koristi od kontrole kontaminacije prehrabbenih proizvoda, pa do proučavanja fundamentalnih procesa u fizici i astrofizici. U  $\gamma$  spektrometriji niskih aktivnosti najvažniji su poluprovodnički Ge detektori i scintilacioni NaI(Tl) detektori. Za povećanje osetljivosti ovih detektora preuzimaju se uglavnom mere za smanjivanje brzine brojanja fona:

- detektor se opkoljava debelim spoljašnjim zaštitnim slojem od Pb ili Fe (najčešće od oko 10 cm Pb);
- dodaje se unutrašnji sloj vrlo čistog materijala,kao što je staro Pb čisto od kontaminacije sa  $^{210}\text{Pb}$  ili elektrolitički rafinirani Cu;
- može se dodati i unutrašnji sloj parafina sa B da bi se termalizovali i apsorbovali neutroni proizvedeni u spoljašnjem zaštitnom sloju protonima iz kosmičkih zraka;
- osnovni detektor se može opkoliti sistemom antikosmičkih brojača za potiskivanje fona od kosmičkih miona i protona.

Najčešće korišćen sistem u  $\gamma$  spektrometriji niskih aktivnosti je Ge spektrometar,čija prednost su veliki uzorci (reda 1 kg) za koje obično nije potrebna velika priprema zbog velike prodorne moći fotona.Njihova visoka rezolucija efektivno smanjuje fon,daje sigurnu identifikaciju  $\gamma$  zraka i omogućava istovremeno određivanje koncentracije aktivnosti pojedinačnih radionuklida u njihovoј smeši.Nedostatak im je jedino mala ukupna efikasnost (svega nekoliko procenata).

### **5.1.Optimalizacija vremena merenja**

Preciznost brzine brojanja,kad se meri jačina slabih radioaktivnih izvora (nezanemarljiva brzina brojanja fona,poluživot duži od razumno dugog vremena merenja),se može proizvoljno povećati produžavajući vreme merenja.Kada je poluživot izvora istog reda veličine kao vreme merenja,može se definisati neko optimalno vreme merenja.Ako se optimum prekorači,dolazi do dodavanja odbroja fona odbroju sada već oslabljenog izvora i do degradacije prikupljene informacije o brzini brojanja.U praksi se optimalno vreme merenja često procenjuje intuitivno.

### **5.2.Položaj izvora gama zraka**

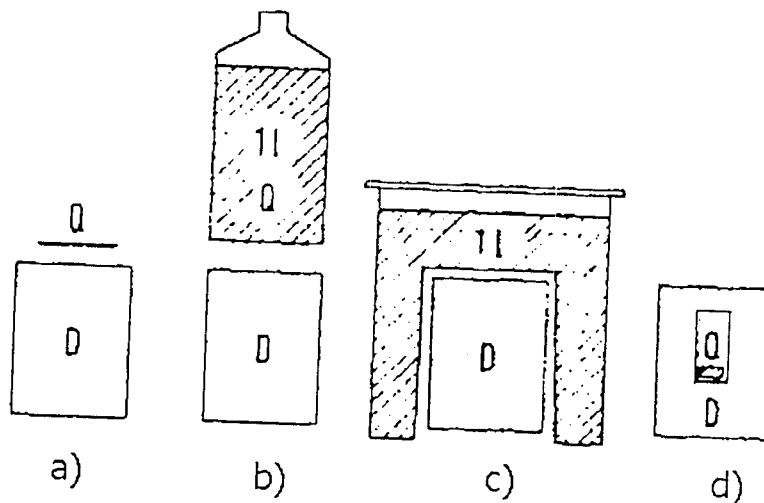
Niske aktivnosti uzorka koje se određuju primenom niskofonskej spektrometrije uslovjavaju postavljanje uzorka uz sam detektor.Prednosti malog rastojanja izvor-detektor su:

- veća brzina brojanja za datu aktivnost izvora;
- manji uticaj pozadinskog zračenja okoline;
- kraće vreme merenja za zahtevani odbroj u vrhovima;
- veći odbroj u vrhovima za dato vreme merenja;
- mogućnost uzimanja manje količine uzorka i time smanjenje korekcije na atenuaciju;
- smanjenje atenuacije fotona u vazduhu (za niskoenergetske fotone).

Međutim treba imati u vidu i izvesne neželjene posledice postavke uzorka na blisko rastojanje u odnosu na detektor:

- potrebne su znatnije korekcije na koincidentno sumiranje;
- veće korekcije na nasumično sumiranje za datu aktivnost izvora;
- slabija procena atenuacije fotona u rasprostranjenim izvorima;
- veća osetljivost efikasnosti detekcije na male promene oblika izvora i njegovog položaja.

Maksimalni efektivni prostorni ugao postiže se u geometrijama u kojima ili izvor opkoljava detektor kada je izvor veliki,ili kada detektor opkoljava izvor kada je izvor mali.Zbog toga se ovakve postavke favorizuju kod merenja niskih aktivnosti.Najveća efikasnost se može postići u geometriji sa detektorima oblika jamie.



Slika 4.-Najčešće korišćene geometrije merenja( $D$ =detektor, $Q$ =izvor) niskih aktivnosti:

- a)izvor u obliku diska na kapi detektora;
- b)boca sa tečnim uzorkom na kapi detektora;
- c)tečni uzorak u Marinelijevom peharu;
- d)izvor unutar detektora oblika jame;

### 5.3.Smanjivanje fona u $\gamma$ spektrometriji

Fon niskofonskih  $\gamma$  spektrometarskih sistema potiče uglavnom od sekundarnog zračenja proizvedenog mionima iz kosmičkih zraka.Za smanjenje njihovog fluksa značajan je pokrivni sloj.Većina površinskih laboratorija ima samo pokrivni sloj koji im daje zgradu.

Najjednostavniji način smanjenja eksternog  $\gamma$  zračenja je prekrivanje cele površine laboratorije slojem Pb ili Fe.Pri gradnji se takođe mogu odabratи čisti materijali (pesak i cement).Eksternoγ zračenje se može smanjiti i postavljanjem detektora u štit sa dovoljno debelim zidovima.Pravljenje glomaznog sistema se izbegava zbog postojanja optimuma debljine a to je 10 cm Pb ili 20 cm Fe.Štit od Pb se može praviti od spoljašnjih 5 cm bilo kakvog Pb i od unutrašnjih 5 cm niskoaktivnog Pb.

Koncentracija Rn u laboratoriji se smanjuje dobrom ventilacijom i premazivanjem odgovarajućim bojama ili presvlačenjem odgovarajućim materijalima poda,zidova i tavanice laboratorije.

Smanjivanje fona se može izvršiti i opkoljavanjem glavnog detektora sistemom zaštitnih detektora.Čestica koja upadne spolja u sistem,okida i zaštitni i glavni detektor,dok čestica iz uzorka okida samo glavni detektor.Glavni i zaštitni detektor su vezani antikoincidentno,pa se signal od spoljašnje upadne čestice ne registruje.Zaštitni detektori se mogu podeliti na tri tipa:  
 1)niz posebnih cilindričnih brojača;  
 2)jedan anularni detektor;  
 3)set pljosnatih brojača.

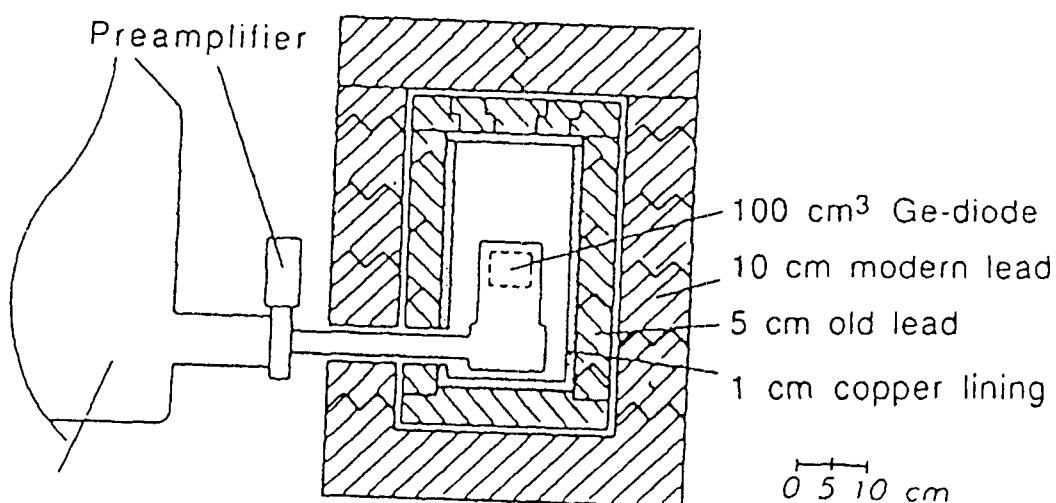
## 6.NISKOFONSKI Ge SPEKTROMETRI

U površinskim laboratorijama,fon niskofonskih Ge spektrometara potiče prvenstveno od kosmičkog zračenja i od njegovih primarnih čestica i od sekundarnog zračenja koje one indukuju u štitu i materijalima unutar njega.

Glavne karakteristike spektara fona niskofonskih Ge sistema u površinskim laboratorijama su:  
 -širok vrh miona na oko 45 MeV;  
 -kontinuum od fotona i elektrona, koji su sekundarno i tercijarno zračenje miona i protona, koji se proteže od najmanjih do najvećih visina impulsa;  
 -anihilacioni vrh na 511 keV;  
 - $\gamma$  vrhovi proizvedeni neutronima u raznim materijalima.

U spektrima dobrih niskofonskih sistema vrhovi od primarnih i antropogenih radionuklida su slabi ili sasvim odsutni.

### 6.1.Niskofonski $\gamma$ spektrometri sa zaštitom od Pb



Slika 5.-Niskofonski Ge spektrometar sa Pb zaštitom

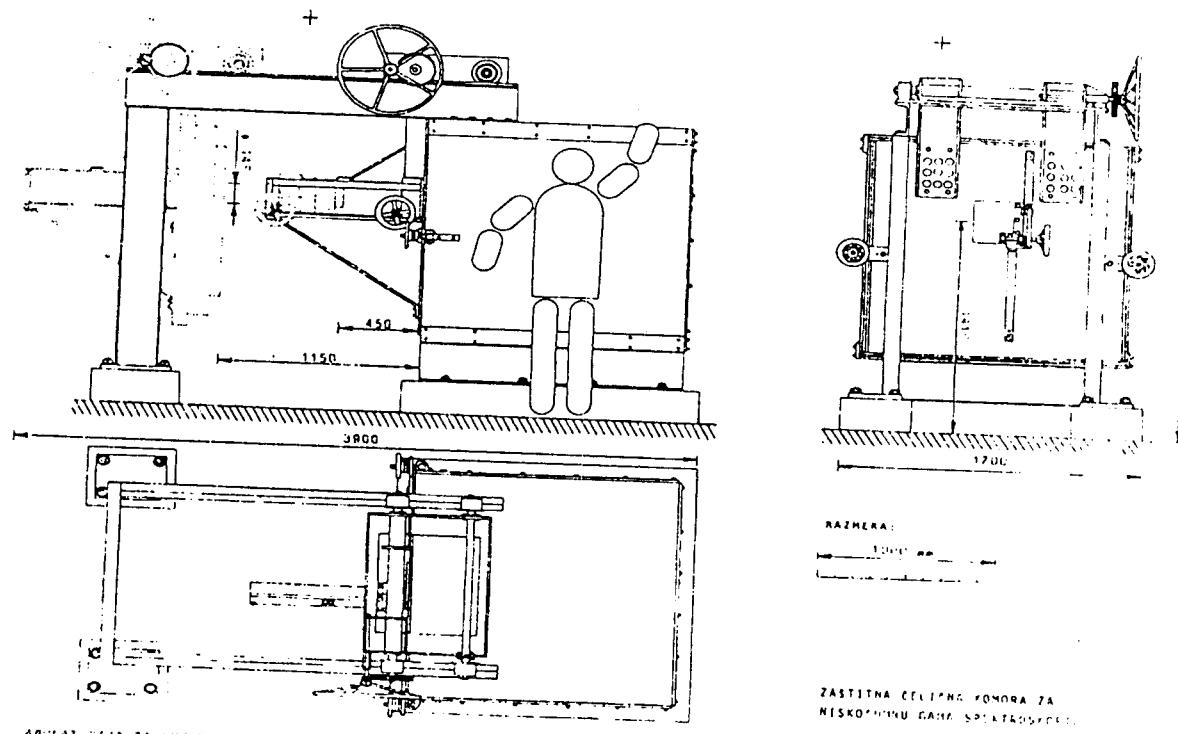
Svi delovi sistema se prave od izabranih materijala čistih od radioaktivnosti.Detektor se nalazi u štitu od 15 cm Pb, od čega je spoljašnjih 10 cm bilo kakvo Pb a unutrašnjih 5 cm je od niskoaktivnog Pb (staro Pb). U laboratoriji za nuklearnu fiziku DFNS je napravljena zaštita od Pb u vreme izrade ovog diplomskog rada.Zaštita ima oblik cilindra i uzdignuta je na drveno postolje na 175 mm od poda. Visina komore je 54 cm, spoljašnji prečnik je 41 cm , unutrašnji 17 cm a debljina zidova je 12 cm.Sa unutrašnje strane je stavljen i sloj Cu, debljine 1 cm, da bi se smanjili intenziteti linija fona na nižim energijama.Zbog svoje relativno male zapremljenosti u ovu komoru se može i uduvavati azot(što se i radi) i time još više smanjiti intenzitet linija fona.

### 6.2.Niskofonski $\gamma$ spektrometri sa zaštitom od Fe

Niska radioaktivnost uzorka ne bi mogla biti registrovana na fonu okoline bez obezbeđenih uslova za niskofonska merenja.Ovde je opisana niskofonska zaštita za  $\gamma$  spektrometre koja postoji u DFNS.Kao zaštitni materijal je izabранo Fe liveno pre II.svetskog rata koje ne sadrži fisione produkte iz vazdušnih nuklearnih eksplozija.Da bi zaštitna komora bila pogodna za različite detektore (sa vertikalnim ili horizontalnim kriostatom),detektor zajedno sa Dewar-ovim sudom može biti smešten unutar komore.Lokacija komore u zgradbi DFNS je takva da je udaljena od svih izvora zračenja i u kojoj nije rađeno sa radioaktivnim izotopima.Zidovi zaštitne komore su sastavljeni od limova debljine 1 cm.Limene ploče su isečene sa starog švedskog broda "Orient II".Ploče su očišćene peskarenjem a komora je kompletno montirana bez zavarivanja.Komora ima oblik kocke sa bočnim pomičnim vratima.Debljina zidova komore iznosi 25 cm a korisna zapremljenost je 1 m<sup>3</sup>.Na pomičnim vratima se nalaze kružna vrata ( $\phi=15$  cm) za postavljanje uzoraka za merenje.Da bi se smanjio uticaj zračenja podloge,cela komora je uzdignuta sa

betonskog postolja na 0.5 m visine pomoću nosača izrađenih od starih železničkih šina. Na zidovima komore postoje samo otvori za dolivanje tečnog azota u Dewar-ov sud ( $\phi=20$  mm), za vođenje električnih kablova do detektora ( $\phi=15$  mm) i dva otvora ( $\phi=20$  mm) za prinudnu ventilaciju.

Merenja performansi komore izvedena su pomoću Ge(Li) spektrometra sa koaksijalnim kristalom sa zatvorenim krajem proizvodača "Canberra". Osetljiva zapremina detektora je oko  $80 \text{ cm}^3$ , efikasnost 14.5% a moć razlaganja ispod 2 keV. Signali iz detektora se preko prepojačavača i pojačavača "Canberra" vode u višekanalni analizator Nuclear Data 2400 sa 4096 kanala.



Slika 6.-Konstrukcija Fe zaštitne komore u DFNS

Rezultati merenja fona u komori pokazali su da je dobijena kvalitetna univerzalna spoljašnja zaštita za bilo koji poluprovodnički spektrometar. Glavna prednost opisane niskofonske zaštite je u tome što omogućuje dalje usavršavanje i dodatnu redukciju fona (eliminisanje radona unutrašnjim izolacionim slojem).

Komora može služiti i za koincidentnu detekciju, jer se u nju mogu istovremeno smestiti i dva detektora.

### 6.3.Niskofonski spektrometri sa aktivnom zaštitom

Za aktivno smanjenje fona se koriste dva tipa antikoincidentnih sistema:

- 1) uklanjanje fotona nastalih Komptonovim rasejanjem;
- 2) uklanjanje impulsa od interakcije visokoenergijskog kosmičkog zračenja;

Ge detektor se opkoljava, što je potpunije moguće, zaštitnim detektorom (NaI(Tl) ili BGO detektor, ili njihova kombinacija).

Debljina scintilatora mora biti dovoljna da sa velikom verovatnoćom zaustavi rasejane fotone.U zavisnosti od materijala scintilatora potrebna je različita debljina sloja (za BGO je potrebno 0.4 debljine NaI(Tl)).

Scintilacioni zaštitni detektor je najčešće oblika cevi sa debelim zidovima u koju je sa jedne strane uvučen Ge detektor.

Nedostaci antikomptonskih sistema su:

- veličina uzorka je ograničena;
- elektronika je kompleksna.

Za redukciju kosmičkog zračenja u niskofonskim sistemima se sve više koriste spoljašnji zaštitni detektori velike površine.Zaštitni detektori se postavljaju sa svih šest strana pasivne zaštite,ali najveći doprinos smanjenju kosmičkog fona (oko 76 %) daje detektor postavljen odgore, pa postoje i sistemi sa samo jednim ovakvim detektorom.

#### 6.4.Niskofonski spektrometar sa aktivnom zaštitom u DFNS

U zaštitnu komoru od Fe se postavlja NaI(Tl) detektor za zaštitu HPGe detektora.Zaštitni detektor je Bicron 9HW9/(6)2L.Signalni se kroz prepojačavač Canberra 2005 i pojačavač 1413 vode u višekanalni analizator Canberra Series 35+MCA.

Energijski odziv NaI(Tl) može odstupati od linearnosti i do 15% ali najveći nedostatak NaI(Tl) je slaba energijska rezolucija.Glavna prednost je njegova efikasnost detekcije (skoro dva reda veća od HPGe).

Kombinacija nadmoćna rezolucije HPGe sa efikasnošću NaI(Tl) detektora se vrši radi postizanja nižih granica detekcije.

#### 7.Ge detektori u DFNS

##### 7.1.HPGe detektor

Gamma spektrometrijski sistem za merenje niskih aktivnosti u laboratoriji za nuklearnu fiziku DFNS sastoji se iz detektora,niskofonske zaštitne komore,bloka uređaja za obradu signala,kalibracionih izvora i računara sa odgovarajućim softverom.

Merenja se vrše na poluprovodničkom detektoru čija je aktivna zapremina izrađena od germanijuma visoke čistoće (HPGe),proizvođača CANBERRA Model G.C.2520-7600.

Radna temperatura je 77K i održava se pomoću kriostata koji je u kontaktu sa tečnim azotom koji se čuva u Dewar-ovom sudu.Kriostatska konfiguracija dozvoljava da se detektor i pored postojanja komore kao niskofonske zaštite,dodatno opkoli zaštitnim materijalom čime bi se fon redukovao za još jedan red veličine,a naročito doprinos od Dewar-ovog suda.

Sakupljanje slobodnih nosilaca nanelektrisanja nastalih upadima  $\gamma$  kvanata i sprečavanje njihove rekombinacije se vrši pomoću izvora visokog (do 5 kV),stabilnog napona na koji je priključen detektor.

##### 7.2.Gamma-X HPGe detektor

Osim HPGe detektora u DFNS postoji i Gamma-X HPGe detektor (GMX).Aktivna zapremina GMX detektora je izrađena od germanijuma visoke čistoće (HPGe),proizvođača ORTEC,USA.tip LLB-GMX-HJ,relativne efikasnosti 32%.

Oznake znače:

LLB(very low background)-detektor namenjen za merenja u uslovima niskog fona;

HJ-oznaka konfiguracije kriostatskog sistema koja omogućuje merenje u niskofonskim uslovima;

GMX-koaksijalni Ge detektor dizajniran i za X i za  $\gamma$  spektroskopiju;  
Spoljašnji jonski implantiran kontakt detektorskog sistema sadrži bor i ima debljinu 0.3  $\mu\text{m}$ .

Obični koaksijalni HPGe detektori imaju spoljašnji kontakt debljine od 500 do 1000  $\mu\text{m}$ ,pa je

efikasnost detekcije niskoenergetskih  $\gamma$  kvanata ( $E < 100$  keV) kod GMX detektora znatno veća nego kod običnih HPGe detektora. Kao unutrašnji kontakt služi litijumski difuzioni sloj debljine 0.9 mm. Tanki ulazni prozor načinjen je od berilijuma debljine 0.5 mm, koeficijenta transparencije približno 95% na 5.9 keV.

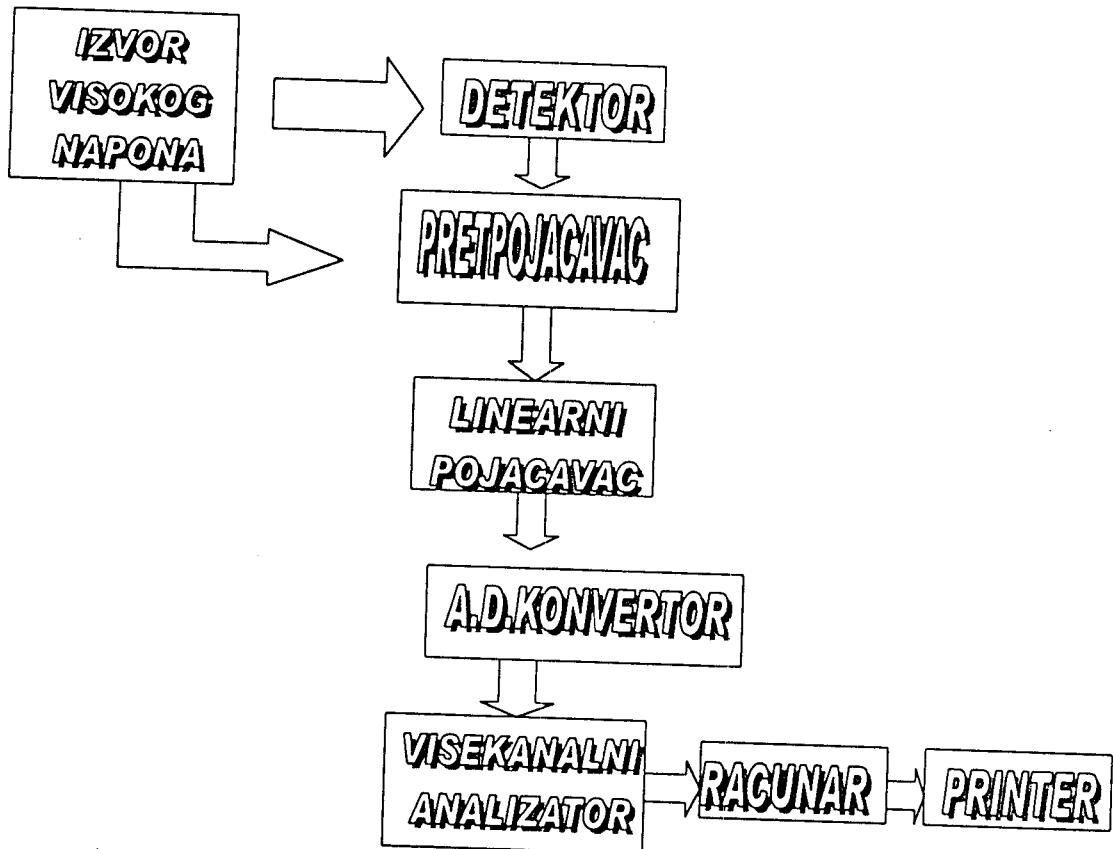
Radna temperatura je 77 K i održava se pomoću kriostata koji je u kontaktu sa tečnim azotom koji se čuva u Dewar-ovom sudu (isto kao kod HPGe detektora).

GMX je takođe priključen na izvor visokog napona (do 5 kV).

#### 8.Uređaji za obradu signala u spektrometarskom sistemu

Sistem za snimanje i obradu spektra, osim detektora  $\gamma$  zračenja i izvora visokog napona (korišćen je CANBERRA H.V. Power Supply model 3105) sadrži i:

1) Prepojačavač ORTEC 257N, sa filterom za visoki napon. Integralna i diferencijalna nelinearnost je  $<0.05\%$  na 90% dinamičkog opsega prepojačavača a njegova temperaturna nestabilnost je  $<50$  ppm/ $^{\circ}\text{C}$ . Osnovna uloga prepojačavača je izdvajanje signala iz detektora bez značajnog smanjenja postojećeg odnosa signal/šum. Zato je prepojačavac lociran uz sam detektor.



Blok shema sistema za snimanje i obradu spektra  $\gamma$  zračenja

2) Pojačavač CANBERRA 2021, integralne nelinearnosti  $<0.05\%$  za ceo dinamički opseg pri konstanti integracije od 2  $\mu\text{s}$ . Grubi stepen pojačanja je 100 a fini 0.3. Promena pojačanja usled varijacije temperature je manja od 75 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ . Osnovni zadatak pojačavača je uvećanje amplitude prepojačavačkog izlaznog impulsa sa milivoltskog opsega na 0.1-10 V opseg. Pojačavač mora raditi u režimu linearног pojačanja (mora povećavati amplitudu impulsa сразмерно prvobitnoj visini).

**3) Analogno-digitalni konvertor CANBERRA 8075** sa maksimalnim opsegom konverzije od 8192 kanala.Ovaj uređaj meri maksimum amplitude analognog ulaznog impulsa i pretvara izmerenu vrednost u digitalni broj.

**4) Višekanalni analizator CANBERRA 35+MCA** sa 8192 kanala.Memorijski prostor je podeljen na dva dela sa po 4096 kanala,što omogućava rad dva detektora.Višekanalni analizator razvrstava,sortira brojeve dobijene za amplitude signala po odgovarajućim kanalima.Širina kanala odgovara nekom energetskom intervalu  $\Delta E$  a svakom kanalu odgovara određena energija.Tako spektar koji daje višekanalni analizator predstavlja zavisnost broja impulsa unutar određenog kanala u funkciji položaja kanala.

**5) Računar PC** sa odgovarajućim programom koji omogućava vizuelizaciju,obradu i čuvanje spektra.

#### **9.Gama linije u spektrima fona**

Snimanje spektara fona je vršeno pomoću HPGe i GmX detektora,koji su se nalazili van bilo kakve zaštite (sem one koju mu daju zidovi i tavanica laboratorije),u zaštitnoj komori od Fe a GmX detektor je bio postavljen i u novonapravljenu zaštitu od Pb i u zaštitu od Pb sa unutrašnjim slojem od Cu,u koju se uduvava azot.Detektori su postavljeni van zaštite da bi se snimili što je moguće kompletnejši spektri fona,odnosno da bi se moglo odrediti i prisustvo spektralnih linija što manjeg intenziteta.Osim za određivanje fonskih linija, snimanje fonskog spektra je imalo za cilj i proveru rada samog HPGe detektora,koji je određeno vreme bio zbog kvara van upotrebe.Obrada fonskog spektra je rađena pomoću računarskog programa za obradu spektra APTEC.Uz program APTEC je korišćena i biblioteka spektralnih linija fona koja postoji u laboratoriji za nuklearnu fiziku DFNS.Sve linije koje se nisu nalazile u biblioteci su identifikovane iz Tabele Radioaktivnih Izotopa sa Univerziteta u Kaliforniji [Browne,Firestone-Table of Radioactive Isotopes].Imena (šifre) pod kojima se spektri nalaze sačuvani u računarima laboratorije za nuklearnu fiziku su:

- 1)MB020810-HPGe bez zaštite;
- 2)MB021003-HPGe u Fe zaštiti;
- 3)LB020924-GmX bez zaštite;
- 4)LB010825-GmX u Fe zaštiti;
- 5)LB021001-GmX u Pb zaštiti;
- 6)LB021007-GmX u zaštiti Pb+Cu+Azot.

U tabelama su dati:položaj pika(kanal),ukupni,neto i fonski odbroj (counts),određena energija E (keV),tablična vrednost energije Et (keV),izotop od kojeg potiče linija i predak dočinog izotopa.Neto odbroj je prikazan zajedno sa greškom odbroja sa nivoom poverenja 68.3%.U koloni za neto odbroj je dat i odnos između neto odbroja i vremena merenja-intenzitet linije (counts/ksec).

#### **9.1.HPGe detektor bez zaštite**

Da bi se mogle odrediti energije posmatranih linija u spektru morala je biti izvršena energijska kalibracija,odnosno svakom kanalu je pripisana određena energija.Kalibracija je izvršena pomoću pet linija:

- 1)kanal 221-U<sup>235</sup> 185.7 keV;
- 2)kanal 668-ANN 511 keV;
- 3)kanal 768-Tl<sup>208</sup> 583.2 keV;
- 4)kanal 1977-K<sup>40</sup> 1460.8 keV;
- 5)kanal 3569-Tl<sup>208</sup> 2614.5 keV;

Ukupno vreme snimanja fonskog spektra je bilo 168315 sekundi a ukupni odbroj za to vreme je bio 21512530 odbroja.

**TABELA 2:MB020810 (HPGe detektor bez zaštite);t=168315 s;N<sub>uk</sub>=21512530 counts  
I=127.811 counts/sec**

Pik kanal	Total counts	Neto $\pm\sigma$ counts counts/ksec	Bckgnd counts	E (keV)	E <sub>t</sub> (keV)	Izotop	Predak
65	194516	4608 $\pm$ 620 <b>27.38<math>\pm</math>3.68</b>	189908	72.02	72.8	Pb-X	
68	225650	31650 $\pm$ 648 <b>188.04<math>\pm</math>3.85</b>	194000	74.38	75.0	Pb-X	
71	209323	11335 $\pm$ 638 <b>67.34<math>\pm</math>3.79</b>	197988	76.57	77.1	Pb-214	U-238
82	148869	9676 $\pm$ 537 <b>57.49<math>\pm</math>3.19</b>	139194	84.57	84.2	Th-231	U-235
85	221716	12601 $\pm$ 656 <b>74.87<math>\pm</math>3.90</b>	209115	86.76	87.3	Pb-X	
93	216752	7214 $\pm$ 653 <b>42.86<math>\pm</math>3.88</b>	209538	92.58	92.6	Th-234	U-238
102	567360	4836 $\pm$ 1063 <b>28.73<math>\pm</math>6.32</b>	562524	99.13	99.6	Ac-228	Th-232
110	429673	7600 $\pm$ 923 <b>45.15<math>\pm</math>5.48</b>	422073	104.15	105.3	Ac-228	Th-232
116	425813	3632 $\pm$ 921 <b>21.58<math>\pm</math>5.47</b>	422181	109.32	109.2	U-235	U-235
142	267383	3933 $\pm$ 729 <b>23.37<math>\pm</math>4.33</b>	263450	128.24	129.1	Ac-228	Th-232
221	173676	12035 $\pm$ 579 <b>71.50<math>\pm</math>3.44</b>	161641	185.73	185.7 186.1	U-235 Ra-226	U-235 U-238
253	137911	6226 $\pm$ 519 <b>36.99<math>\pm</math>3.09</b>	131685	209.01	209.3	Ac-228	Th-232
294	204781	66827 $\pm$ 585 <b>397.04<math>\pm</math>3.48</b>	137954	238.84	238.6	Pb-212	Th-232
298	138522	10144 $\pm$ 517 <b>60.27<math>\pm</math>3.07</b>	128378	241.75	241.9	Pb-214	U-238
337	81841	6614 $\pm$ 396 <b>39.30<math>\pm</math>2.36</b>	75227	270.11	270.3	Ac-228	Th-232
347	74481	3226 $\pm$ 382 <b>19.17<math>\pm</math>2.27</b>	71225	277.39	277.4	Tl-208	Th-232
371	107539	30917 $\pm$ 429 <b>183.69<math>\pm</math>2.55</b>	76622	294.84	295.2	Pb-214	U-238
378	79551	5191 $\pm$ 392 <b>30.84<math>\pm</math>2.33</b>	74360	299.93	300.1	Pb-212	Th-232
417	54642	4717 $\pm$ 323 <b>28.02<math>\pm</math>1.92</b>	49925	328.29	328.0	Ac-228	Th-232

431	64567	18135±333 <b>107.74±1.98</b>	46432	338.48	338.3	Ra-223	U-235
450	108578	56119±401 <b>333.42±2.38</b>	52459	352.29	351.9	Pb-214	U-238
529	33914	2413±256 <b>14.34±1.52</b>	31501	409.73	409.6	Ac-228	Th-232
569	42290	1983±287 <b>11.78±1.71</b>	40307	438.81	438.8	Po-215	U-235
603	31228	6860±236 <b>40.76±1.40</b>	24368	463.52	463.1	Ac-228	Th-232
668	49190	21943±276 <b>130.37±1.64</b>	27247	<b>511</b>	<b>511</b> 510.8	ANN Tl-208	Th-232
739	41526	1269±286 <b>7.54±1.70</b>	40257	562.35	563.3	Cs-134	Chern
768	63667	42578±291 <b>252.97±1.73</b>	21089	<b>583.2</b>	<b>583.2</b>	Tl-208	Th-232
804	79275	60601±313 <b>360.05±1.86</b>	18674	609.58	609.3	Bi-214	U-238
876	11676	1450±148 <b>8.62±0.88</b>	10226	661.88	661.7	Cs-137	Chern
882	15021	1438±169 <b>8.54±1.01</b>	13583	666.24	666.6	Pa-234	U-238
967	23650	9379±195 <b>55.72±1.16</b>	14271	727.97	727.3	Bi-212	Th-232
1005	14554	1160±167 <b>6.89±0.99</b>	13394	755.57	755.3	Ac-228	Th-232
1016	8594	519±129 <b>3.08±0.77</b>	8075	763.55	763.1	Tl-208	Th-232
1020	11124	711±147 <b>4.22±0.87</b>	10413	766.50	766.6	Pa234m	U-238
1023	19085	4831±183 <b>28.70±1.09</b>	14254	768.64	768.3	Bi-214	U-238
1029	14365	545±168 <b>3.24±1.00</b>	13820	772.99	772.4	Ac-228	Th-232
1047	14974	2647±165 <b>15.73±0.98</b>	12327	786.06	785.6	Bi-212	Th-232
1060	19555	5391±184 <b>32.03±1.09</b>	14164	795.50	794.9	Ac-228	Th-232
1075	13187	1746±157 <b>10.37±0.93</b>	11441	806.39	806.1	Bi-214	U-238
1116	13056	1080±158 <b>6.42±0.94</b>	11976	836.16	835.7	Ac-228	Th-232
1122	14693	928±169 <b>5.51±1.01</b>	13765	840.52	840.4	Ac-228	Th-232

1150	16308	5909±163 <b>35.11±0.97</b>	10399	860.85	860.6	Tl-208	Th-232
1210	13323	1403±159 <b>8.34±0.94</b>	11920	904.40	904.3	Bi-214	U-238
1220	45253	33348±239 <b>198.13±1.42</b>	11905	911.67	911.1	Ac-228	Th-232
1252	14630	3600±160 <b>21.39±0.95</b>	11030	934.88	934.0	Bi-214	U-238
1274	14282	1391±165 <b>8.26±0.98</b>	12891	950.85	949.8	K-40 SESC	
1294	19169	559±194 <b>3.32±1.15</b>	18610	965.37	964.8	Ac-228	Th-232
1300	30718	17549±209 <b>104.26±1.25</b>	13169	969.72	969.0	Ac-228	Th-232
1343	9431	948±134 <b>5.63±0.80</b>	8484	1000.93	1001.0	Pa234m	U-238
1414	8654	462±130 <b>2.75±0.77</b>	8193	1052.45	1051.9	Bi-214	U-238
1451	7175	643±117 <b>3.82±0.70</b>	6532	1079.29	1078.7	Bi-212	Th-232
1508	29548	18006±203 <b>106.98±1.20</b>	11542	1120.65	1120.4	Bi-214	U-238
1556	15459	2204±169 <b>13.09±1.01</b>	13255	1155.47	1155.2	Bi-214	U-238
1594	5403	346±102 <b>2.06±0.61</b>	5057	1183.04	1181.3	Rn-211	
1629	11185	733±147 <b>4.35±0.87</b>	10452	1208.43	1208.0	Tl-210	U-238
1671	19031	7194±176 <b>42.74±1.04</b>	11837	1238.89	1238.8	Bi-214	U-238
1683	7669	414±122 <b>2.46±0.73</b>	7255	1247.59	1246.6	Ac-228	Th-232
1729	8502	1575±124 <b>9.36±0.74</b>	6927	1280.96	1280.9	Bi-214	U-238
1863	9547	4622±120 <b>27.46±0.72</b>	4925	1378.13	1377.6	Bi-214	U-238
1873	4256	823±88 <b>4.89±0.52</b>	3433	1385.38	1385.3	Bi-214	U-238
1896	6128	1347±104 <b>8.00±0.62</b>	4781	1402.06	1401.5	Bi-214	U-238
1905	8684	2321±123 <b>13.79±0.73</b>	6363	1408.59	1408.0	Bi-214	U-238
1977	168230	163303±416 <b>970.22±2.47</b>	4927	1460.80	1460.8	K-40	

2026	3908	831±84 <b>4.94±0.50</b>	3077	1496.32	1496.0	Ac-228	Th-232
2034	1673	299±55 <b>1.78±0.33</b>	1374	1502.12	1501.4	Ac-228	Th-232
2044	4819	2105±87 <b>12.51±0.52</b>	2714	1509.37	1509.2	Bi-214	U-238
2049	2490	422±68 <b>2.51±0.40</b>	2068	1512.99	1512.8	Bi-212	Th-232
2084	2377	348±66 <b>2.07±0.39</b>	2029	1538.36	1538.0	Tl-210	U-238
2091	2517	73±70 <b>0.43±0.42</b>	2444	1543.44	1543.4	Bi-214	U-238
2143	2326	345±66 <b>2.05±0.39</b>	1981	1581.14	1580.3	Ac-228	Th-232
2146	1177	223±46 <b>1.33±0.27</b>	954	1583.31	1583.2	Bi-214	U-238
2153	6095	2917±96 <b>17.33±0.57</b>	3178	1588.38	1588.2	Ac-228	Th-232
2159	7371	4371±102 <b>25.97±0.61</b>	3000	1592.73	1592.5	Tl-208 DESC	Th-232
2169	2438	482±66 <b>2.86±0.39</b>	1956	1599.98	1599.3	Bi-214	U-238
2198	3606	1588±75 <b>9.44±0.45</b>	2018	1621.00	1620.6	Bi-212	Th-232
2203	1162	42±48 <b>0.25±0.28</b>	1120	1624.63	1625.1	Ac-228	Th-232
2211	3310	1669±70 <b>9.92±0.42</b>	1641	1630.43	1630.6	Ac-228	Th-232
2222	2318	442±65 <b>2.63±0.39</b>	1876	1638.40	1638.1	Ac-228	Th-232
2254	2813	1124±67 <b>6.68±0.40</b>	1689	1661.60	1661.3	Bi-214	U-238
2348	4881	3100±82 <b>18.42±0.49</b>	1781	1729.73	1729.6	Bi-214	U-238
2396	19546	17149±148 <b>101.89±0.88</b>	2397	1764.52	1764.5	Bi-214	U-238
2498	1494	307±52 <b>1.82±0.31</b>	1188	1838.44	1838.4	Bi-214	U-238
2510	3714	1954±74 <b>11.61±0.44</b>	1760	1847.14	1847.4	Bi-214	U-238
2863	7364	5213±98 <b>30.97±0.58</b>	2151	2102.93	2103.5	Tl-208 SESC	Th-232
2884	2576	1131±63 <b>6.72±0.37</b>	1445	2118.15	2118.5	Bi-214	U-238

3002	7017	5125±94 30.45±0.56	1892	2203.65	2204.1	Bi-214	U-238
3125	1687	305±55 1.81±0.33	1382	2292.77	2293.3	Bi-214	U-238
3339	2596	1542±60 9.16±0.36	1054	2447.84	2447.7	Bi-214	U-238
3569	37714	37401±195 222.21±1.16	313	2614.50	2614.5	Tl-208	Th-232

## 9.2.HPGe detektor u Fe zaštiti

Linije za energetsku kalibraciju su:

- 1)kanal 225-185.7 keV
- 2)kanal 459-351.9 keV
- 3)kanal 682-511 keV
- 4)kanal 783-583.2 keV
- 5)kanal 820-609.3 keV
- 6)kanal 2016-1460.8 keV.

**Tabela 3:MB021003 (HPGe detektor u Fe zaštiti);t=72060 s;N<sub>uk</sub>=99574 counts  
I=1.382 counts/sec**

Pik kanal	Total counts	Neto±σ counts counts/ksec	Bckgnd counts	E (keV)	Et (keV)	Izotop	Predak
30	1038	127±44 1.76±0.61	911	47.68	46.5	Pb-210	U-238
54	2804	281±73 3.90±1.01	2523	65.64	65.5	Pb-211	U-235
70	3504	572±80 7.94±1.11	2932	76.81	77.1	Pb-214	U-238
95	2667	308±71 4.27±0.98	2359	94.28	94.6	Pa-234	U-238
225	2120	363±62 5.04±0.86	1757	185.7	185.7 186.3	U-235 Ra-226	U-235 U-238
300	2489	710±65 9.85±0.91	1779	238.79	238.6	Pb-212	Th-232
379	930	177±41 2.46±0.57	753	294.90	295.2	Pb-214	U-238
459	889	331±38 4.59±0.53	558	351.9	351.9	Pb-214	U-238
682	1436	904±44 12.52±0.62	532	511	511 510.8	ANN Tl-208	Th-232
783	352	87±25 1.21±0.35	266	583.2	583.2	Tl-208	Th-232
820	491	231±27 3.21±0.38	260	609.3	609.3	Bi-214	U-238

894	437	165±27 2.29±0.38	272	661.93	661.7	Cs-137	Chern
2016	93	41±12 0.57±0.17	52	1460.8	1460.8	K-40	

U sledećoj tabeli su dati odnosi između intenziteta nekih linija i kontinuuma snimljenih HPGe detektorom bez zaštite i u Fe zaštiti.

Tabela 4:

Linija (keV)-Izotop	I <sub>Hb</sub> (counts/ksec)	I <sub>Hf</sub> (counts/ksec)	I <sub>Hb</sub> /I <sub>Hf</sub>
I	127811.13	1381.82	92.49
100-120 keV	12171.96	87.29	139.45
200-220 keV	5660.45	59.73	94.77
380-400 keV	1429.03	19.51	73.24
620-640 keV	576.95	7.15	80.70
810-830 keV	378.28	4.54	83.36
1020-1040 keV	278.86	3.15	88.52
1290-1310 keV	183.57	2.03	90.60
1550-1570 keV	57.13	1.35	42.44
1780-1800 keV	40.20	1.36	29.56
2000-2020 keV	34.40	1.36	25.29
2220-2240 keV	36.05	0.78	46.39
185.7=U-235	71.50±3.44	5.04±0.86	14.19±2.52
351.9=Pb-214	333.42±2.38	4.59±0.53	72.64±8.40
511=ANN	130.37±1.64	12.52±0.62	10.41±0.53
583.2=Tl-208	252.97±1.73	1.21±0.35	209.07±60.49
609.19=Bi-214	360.05±1.86	3.21±0.38	112.17±13.29
661.66=Cs-137	8.62±0.88	2.29±0.38	3.76±0.73
1460.8=K-40	970.22±2.47	0.57±0.17	1702.14±507.67

I<sub>Hb</sub>-intenzitet linije u HPGe bez zaštite;

I<sub>Hf</sub>-intenzitet linije u HPGe u Fe zaštiti;

### 9.3.GmX detektor bez zaštite

Linije za energetsku kalibraciju:

1)kanal 330-185.7 keV

2)kanal 972-511 keV

3)kanal 1115-583.2 keV

4)kanal 1166-609.3 keV

5)kanal 2848-1460.8 keV.

U kolonama tabela spektara snimljenih GmX detektorom su dati:pik-kanal maksimalnog odbroja linije, total-ukupni odbroj linije, neto odbroj linije sa greškom (nivo poverenja 68.3%) i intenzitet linije, odbroj fona, određena energija, tablična vrednost energije, izotop od kojeg potiče linija i predak izotopa (ako je izotop iz nekog radioaktivnog niza).

**Tabela 5:LB020924 (GmX detektor bez zaštite);t=65601 s;N<sub>uk</sub>=11946279 counts  
I=182.105 counts/sec**

Pik kanal	Total counts	Neto $\pm\sigma$ counts counts/ksec	Bckgnd counts	E (keV)	Et (keV)	Izotop	Predak
17	157838	1852 $\pm$ 560 <b>28.23<math>\pm</math>8.54</b>	155986	26.99	27.3	In-X	
111	205136	7529 $\pm$ 635 <b>114.77<math>\pm</math>9.67</b>	197607	74.67	75.0	Pb-X	
115	132640	7733 $\pm$ 507 <b>117.88<math>\pm</math>7.74</b>	124907	76.70	77.1	Pb-212	Th-232
135	234023	3957 $\pm$ 681 <b>60.32<math>\pm</math>10.38</b>	230066	86.84	87.3	Pb-X	
141	143421	1587 $\pm$ 534 <b>24.19<math>\pm</math>8.14</b>	141834	89.88	90.1	Pb-212	Th-232
146	194811	2085 $\pm$ 623 <b>31.78<math>\pm</math>9.49</b>	192726	92.42	92.6	Th-234	U-238
185	145849	1023 $\pm$ 539 <b>15.59<math>\pm</math>8.22</b>	144826	112.19	113.1	Th-227	U-235
190	168765	1761 $\pm$ 579 <b>26.84<math>\pm</math>8.83</b>	167004	114.73	115.1	Pb-212	Th-232
195	190141	1925 $\pm$ 615 <b>29.34<math>\pm</math>9.38</b>	188216	117.26	117.2	Th-227	U-235
202	141150	1820 $\pm$ 530 <b>27.74<math>\pm</math>8.07</b>	139330	120.81	120.9	Ac-227	U-235
210	185098	2581 $\pm$ 606 <b>39.34<math>\pm</math>9.24</b>	182517	124.87	124.1	Bi-212	Th-232
218	338292	4087 $\pm$ 820 <b>62.30<math>\pm</math>12.50</b>	334205	128.92	129.1	Ac-228	Th-232
242	146024	946 $\pm$ 540 <b>14.42<math>\pm</math>8.22</b>	145078	141.09	141.3	Pb-214	U-238
247	162823	1223 $\pm$ 570 <b>18.64<math>\pm</math>8.68</b>	161600	143.63	143.8	U-235	U-235
330	189568	5552 $\pm$ 611 <b>84.63<math>\pm</math>9.32</b>	184016	185.7	185.7 186.3	U-235 Ra-226	U-235 U-238
376	97027	4374 $\pm$ 436 <b>66.68<math>\pm</math>6.64</b>	92653	209.02	209.3	Ac-228	Th-232
390	77925	959 $\pm$ 394 <b>14.62<math>\pm</math>6.00</b>	76966	216.11	216.0	Th-228	Th-232
422	68821	865 $\pm$ 370 <b>13.19<math>\pm</math>5.64</b>	67956	232.33	232.3	Ac-228	Th-232
429	67813	2133 $\pm$ 365 <b>32.51<math>\pm</math>5.57</b>	65680	235.88	236.0	Th-227	U-235
434	107429	44024 $\pm$ 413 <b>671.09<math>\pm</math>6.30</b>	63405	238.41	238.6	Pb-212	Th-232

440	137942	10201±515 155.50±7.86	127741	241.45	241.9	Pb-214	U-238
496	72473	4270±375 65.09±5.72	68203	269.83	270.2	Ac-228	Th-232
511	59792	1030±344 15.70±5.25	58762	277.43	277.4	Tl-208	Th-232
546	68398	17374±346 264.84±5.27	51024	295.17	295.2	Pb-214	U-238
556	94175	3236±430 49.33±6.56	90939	300.24	300.1	Pb-212	Th-232
610	34728	2655±251 40.47±3.94	32073	327.59	328.0	Ac-228	Th-232
631	57309	10446±323 159.24±4.92	46863	338.23	338.3	Ra-223	U-235
658	79982	33586±355 511.97±5.42	46396	351.91	351.9	Pb-214	U-238
727	45389	710±300 10.82±4.57	44679	386.87	386.8	Bi-214	U-238
771	25080	1412±221 21.52±3.37	23668	409.15	409.5	Ac-228	Th-232
877	43145	3269±288 49.83±4.39	39876	462.84	463.0	Ac-228	Th-232
972	52216	14779±299 225.29±4.56	37437	511	511 510.8	ANN Tl-208	
1074	23031	1051±212 16.02±3.23	21980	562.60	563.3	Cs-134	Chern
1115	56635	24503±298 373.52±4.54	32132	583.2	583.2	Tl-208	Th-232
1166	50571	36154±255 551.12±3.89	14417	609.3	609.3	Bi-214	U-238
1269	12394	1194±154 18.20±2.34	11200	661.33	661.7	Cs-137	Chern
1277	17054	977±182 14.89±2.77	16077	665.38	665.4	Bi-214	U-238
1385	11469	366±150 5.58±2.29	11103	720.06	719.9	Bi-214	U-238
1399	23951	5558±206 84.72±3.14	18393	727.15	727.3	Bi-212	Th-232
1455	12085	804±153 12.26±2.33	11281	755.49	755.3	Ac-228	Th-232
1470	9602	552±137 8.41±2.08	9050	763.09	763.1	Tl-208	Th-232
1480	16033	4117±167 63.67±2.55	11916	768.15	768.4	Bi-214	U-238

1488	10703	906±143 <b>13.81±2.18</b>	9797	772.20	772.4	Ac-228	Th-232
1508	8078	503±125 <b>7.67±1.91</b>	7575	782.32	782.1	Ac-228	Th-232
1514	15601	1585±172 <b>24.16±2.62</b>	14016	785.36	785.6	Bi-212	Th-232
1533	20268	2986±194 <b>45.52±2.95</b>	17282	794.98	794.9	Ac-228	Th-232
1555	13433	1019±161 <b>15.53±2.45</b>	12414	806.12	806.1	Bi-214	U-238
1603	9117	254±134 <b>3.87±2.04</b>	8863	830.41	830.6	Ac-228	Th-232
1613	7168	1067±115 <b>16.26±1.76</b>	6101	835.48	835.7	Ac-228	Th-232
1622	13068	1051±158 <b>16.02±2.41</b>	12017	840.03	840.4	Ac-228	Th-232
1662	13918	3324±157 <b>50.67±2.39</b>	10594	860.28	860.6	Tl-208	Th-232
1749	8483	677±128 <b>10.32±1.95</b>	7806	904.32	904.3	Bi-214	U-238
1762	31591	19530±209 <b>297.71±3.18</b>	12061	910.90	911.2	Ac-228	Th-232
1808	10238	2201±135 <b>33.55±2.06</b>	8037	934.19	934.0	Bi-214	U-238
1838	11664	910±150 <b>13.87±2.28</b>	10754	949.37	948.4	Ac-228	Th-232
1856	7188	255±119 <b>3.89±1.81</b>	6933	958.48	958.6	Th-227	U-235
1868	11791	4281±139 <b>65.26±2.12</b>	7510	964.56	964.8	Ac-228	Th-232
1877	23804	11787±189 <b>179.68±2.89</b>	12017	969.11	969.0	Ac-228	Th-232
1940	9720	576±137 <b>8.78±2.09</b>	9144	1001.00	1001.0	234mPa	U-238
2041	5318	240±102 <b>3.66±1.55</b>	5078	1052.13	1051.9	Bi-214	U-238
2093	7979	352±125 <b>5.37±1.90</b>	7627	1078.46	1078.7	Bi-212	Th-232
2156	5983	249±108 <b>3.80±1.65</b>	5734	1110.35	1110.7	Pa-228	Th-232
2175	20174	10573±173 <b>161.17±2.63</b>	9601	1119.97	1120.4	Bi-214	U-238
2202	4613	244±95 <b>3.72±1.44</b>	4370	1133.64	1133.7	Bi-214	U-238

2244	6838	1017±113 <b>15.50±1.72</b>	5821	1154.90	1155.2	Bi-214	U-238
2349	6302	284±111 <b>4.33±1.69</b>	6018	1208.07	1208.0	Tl-210	U-238
2408	15239	4307±162 <b>65.65±2.47</b>	10932	1237.94	1238.8	Bi-214	U-238
2493	6042	892±106 <b>13.60±1.61</b>	5150	1280.99	1280.9	Bi-214	U-238
2684	8012	2867±115 <b>43.70±1.75</b>	5145	1377.72	1377.6	Bi-214	U-238
2699	5855	562±106 <b>8.57±1.61</b>	5293	1385.32	1385.3	Bi-214	U-238
2731	6169	991±107 <b>15.11±1.62</b>	5178	1401.53	1401.5	Bi-214	U-238
2744	5453	1661±96 <b>25.32±1.47</b>	3792	1408.11	1408.0	Bi-214	U-238
2830	2040	219±62 <b>3.34±0.95</b>	1821	1451.68	1451.2	Ac-228	Th-232
2837	1876	451±57 <b>6.87±0.87</b>	1425	1455.23	1455.3	Fr-227	U-235
2848	101177	97150±324 <b>1480.92±4.94</b>	4027	1460.8	1460.8	K-40	
2918	2668	619±69 <b>9.44±1.05</b>	2049	1496.27	1496.0	Ac-228	Th-232
2929	2803	281±73 <b>4.28±1.11</b>	2522	1501.84	1501.4	Ac-228	Th-232
2944	5097	1627±93 <b>24.80±1.41</b>	3470	1509.44	1509.2	Bi-214	U-238
3003	2246	335±64 <b>5.11±0.98</b>	1911	1539.34	1538.9	Rn-211	U-235
3012	1496	221±53 <b>3.37±0.80</b>	1275	1543.90	1543.4	Bi-214	U-238
3037	1603	122±56 <b>1.86±0.85</b>	1481	1556.57	1557.0	Ac-228	Th-232
3085	1650	474±53 <b>7.23±0.81</b>	1176	1580.90	1580.3	Ac-228	Th-232
3091	1555	513±51 <b>7.82±0.78</b>	1042	1583.94	1583.2	Bi-214	U-238
3100	3514	2215±59 <b>33.76±0.90</b>	1299	1588.50	1588.2	Ac-228	Th-232
3109	4161	2348±77 <b>35.79±1.18</b>	1813	1593.06	1592.6	Pa-234	U-238
3122	1166	134±47 <b>2.04±0.71</b>	1032	1599.65	1599.3	Bi-214	U-238

3165	2601	1015±65 <b>15.47±0.99</b>	1586	1621.45	1620.6	Bi-212	Th-232
3174	1061	107±45 <b>1.63±0.68</b>	954	1626.01	1625.1	Ac-228	Th-232
3184	2988	1017±70 <b>15.50±1.07</b>	1971	1631.08	1630.6	Ac-228	Th-232
3199	1890	325±59 <b>4.95±0.90</b>	1565	1638.69	1638.1	Ac-228	Th-232
3245	1978	712±57 <b>10.85±0.87</b>	1266	1662.01	1661.3	Bi-214	U-238
3254	1171	110±47 <b>1.68±0.72</b>	1061	1666.57	1666.4	Ac-228	Th-232
3291	1492	148±53 <b>2.26±0.81</b>	1344	1685.33	1686.0	Ac-228	Th-232
3304	932	112±42 <b>1.71±0.64</b>	820	1691.92	1691.7	Ac-230	U-238
3308	829	115±39 <b>1.75±0.60</b>	714	1693.95	1694.2	Pa-234	U-238
3380	3744	1751±76 <b>26.69±1.15</b>	1993	1730.47	1729.6	Bi-214	U-238
3431	775	67±39 <b>1.02±0.59</b>	708	1756.33	1756.0	Pa-234	U-238
3437	793	105±38 <b>1.60±0.58</b>	688	1759.38	1759.1	Pa-234	U-238
3446	11919	10075±117 <b>153.58±1.79</b>	1844	1763.94	1764.6	Bi-214	U-238
3586	1220	150±48 <b>2.29±0.73</b>	1070	1834.97	1835.1	Ac-228	Th-232
3603	2656	1192±64 <b>18.17±0.98</b>	1464	1843.60	1842.3	Ac-228	Th-232
3768	740	64±38 <b>0.98±0.58</b>	676	1927.34	1926.0	Pa-234	U-238
4070	5210	2780±87 <b>42.38±1.33</b>	2430	2080.73	2080.4	Ge-67	

#### 9.4.GmX u Fe zaštiti

Linije za energetsku kalibraciju:

- 1)kanal 331-185.7 keV
- 2)kanal 973-511 keV
- 3)kanal 1116-583.2 keV
- 4)kanal 1167-609.3 keV
- 5)kanal 2851-1460.8 keV.

Tabela 6:LB010825 (GmX u Fe zaštiti); t=175414 s; N<sub>uk</sub>=304402 counts;  
 I=1.735 counts/sec.

Pik kanal	Total counts	Neto $\pm\sigma$ counts counts/ksec	Bckgnd counts	E (keV)	Et (keV)	Izotop	Predak
10	1773	313 $\pm$ 57 1.78 $\pm$ 0.32	1460	22.98	24.2	In-X	
16	1497	119 $\pm$ 54 0.68 $\pm$ 0.31	1378	26.02	27.3	In-X	
55	2719	194 $\pm$ 72 1.11 $\pm$ 0.41	2525	45.80	46.5	Pb-210	U-238
88	1814	50 $\pm$ 60 0.29 $\pm$ 0.34	1764	62.53	63.3	Th-234	U-238
111	3138	552 $\pm$ 76 3.15 $\pm$ 0.43	2586	74.19	75.0	Pb-X	
115	3724	1146 $\pm$ 79 6.53 $\pm$ 0.45	2578	76.21	77.1	Pb-212	Th-232
135	2781	184 $\pm$ 73 1.05 $\pm$ 0.42	2597	86.35	87.3	Pb-X	
146	2090	199 $\pm$ 63 1.13 $\pm$ 0.36	1891	91.93	92.6	Th-234	U-238
240	2067	136 $\pm$ 63 0.78 $\pm$ 0.36	1931	139.58		Ge(n, $\gamma$ )Gc	
260	1937	56 $\pm$ 62 0.32 $\pm$ 0.35	1881	149.72	150.0	Th-227	U-235
331	5412	177 $\pm$ 103 1.01 $\pm$ 0.59	5235	185.7	185.7 186.3	U-235 Ra-226	U-235 U-238
434	2836	898 $\pm$ 69 5.12 $\pm$ 0.39	1938	237.90	238.6	Pb-212	Th-232
441	3048	662 $\pm$ 74 3.77 $\pm$ 0.42	2386	241.45	241.9	Pb-214 Bi-214	U-238 U-238
546	3244	1332 $\pm$ 72 7.59 $\pm$ 0.41	1912	294.65	295.2	Pb-214	U-238
632	1011	124 $\pm$ 44 0.71 $\pm$ 0.25	887	338.23	338.3	Ra-223	U-235
659	3374	2282 $\pm$ 67 13.01 $\pm$ 0.38	1092	351.91	351.9	Pb-214	U-238
724	917	96 $\pm$ 42 0.55 $\pm$ 0.24	821	384.83	385.0	Pa-231	U-235
973	4566	3038 $\pm$ 78 17.32 $\pm$ 0.45	1528	511	511 510.8	ANN Tl-208	Th-232
1116	774	251 $\pm$ 36 1.43 $\pm$ 0.21	523	583.2	583.2	Tl-208	Th-232
1167	2477	1942 $\pm$ 55 11.07 $\pm$ 0.31	535	609.3	609.3	Bi-214	U-238

1270	403	56±27 0.32±0.16	347	661.33	661.7	Cs-137	Chern
1401	316	57±24 0.33±0.14	259	727.64	727.3	Bi-212	Th-232
1482	533	126±31 0.72±0.17	407	768.63	768.4	Bi-214	U-238
1576	361	66±26 0.38±0.15	295	816.20	816.6	Ac-228	Th-232
1586	237	45±21 0.26±0.12	192	821.26	821.2	Bi-214	U-238
1637	489	215±28 1.23±0.16	274	847.07	847.2	Bi-214	U-238
1664	249	46±21 0.26±0.12	203	860.73	860.6	Tl-208	Th-232
1764	385	149±25 0.85±0.14	236	911.32	911.2	Ac-228	Th-232
1810	366	131±25 0.75±0.14	235	934.59	934.0	Bi-214	U-238
2178	581	398±28 2.27±0.16	183	1120.70	1120.4	Bi-214	U-238
2245	216	67±19 0.38±0.11	149	1154.57	1155.2	Bi-214	U-238
2411	322	158±22 0.90±0.13	164	1238.48	1238.8	Bi-214	U-238
2687	246	61±21 0.35±0.12	185	1377.95	1377.6	Bi-214	U-238
2747	174	58±17 0.33±0.10	116	1408.26	1408.0	Bi-214	U-238
2851	441	327±24 1.86±0.13	114	1460.8	1460.8	K-40	
2945	99	31±13 0.18±0.07	68	1508.28	1509.2	Bi-214	U-238
2948	84	28±12 0.16±0.07	56	1509.79	1509.2	Bi-214	U-238
3384	144	52±15 0.30±0.09	92	1729.92	1729.6	Bi-214	U-238
3451	420	299±23 1.70±0.13	121	1763.73	1764.6	Bi-214	U-238
3607	74	26±11 0.15±0.06	48	1842.45	1842.3	Ac-228	Th-232

## 9.5.GmX u Pb zaštiti

Linije korišćene za energetsku kalibraciju:

- 1)kanal 330-185.7 keV
- 2)kanal 972-511 keV
- 3)kanal 1166-609.3 keV
- 4)kanal 2848-1460.8 keV.

**Tabela 7:LB021001 (GmX u Pb zaštiti);t=568272 s;N<sub>uk</sub>=579909 counts;  
I=1.021 counts/sec.**

Pik kanal	Total counts	Neto±σ counts counts/ksec	Bckgnd counts	E (keV)	Et (keV)	Izotop	Predak
10	4670	979±91 <b>1.72±0.16</b>	3691	23.24	24.2	In-X	
17	3485	152±83 <b>0.27±0.14</b>	3333	26.80	27.3	In-X	
55	5428	1944±94 <b>3.42±0.17</b>	3484	46.10	46.5	Pb-210	U-238
88	5098	680±98 <b>1.20±0.17</b>	4418	62.86	63.3	Th-234	U-238
94	6498	1395±108 <b>2.45±0.19</b>	5103	65.91	66.4 65.1	Au-X Pt-X Ge(n,n')Ge	
107	9864	5688±118 <b>10.01±0.21</b>	4176	72.51	72.8	Pb-X	
111	12377	9337±124 <b>16.43±0.22</b>	3040	74.55	75.0	Pb-X	
115	2969	496±74 <b>0.87±0.13</b>	2473	76.58	77.1	Pb-212	Th-232
130	9818	5109±121 <b>8.99±0.21</b>	4709	84.19	84.2 84.4	Th-231 Pb-X	U-235
135	4499	1832±85 <b>3.22±0.15</b>	2667	86.73	87.3	Pb-X	
145	2466	151±69 <b>0.27±0.12</b>	2315	91.81	92.6	Th-234	U-238
239	5668	467±104 <b>0.82±0.18</b>	5201	139.53		Ge(n,γ)Ge	
247	3831	146±87 <b>0.26±0.15</b>	3685	143.59	143.8	U-235	U-235
330	5160	82±101 <b>0.14±0.18</b>	5078	185.7	185.7 186.3	U-235 Ra-226	U-235 U-238
355	4438	446±92 <b>0.78±0.16</b>	3992	198.38		Ge(n,γ)Ge-As	
375	3492	159±83 <b>0.28±0.14</b>	3333	208.53	209.3	Ac-228	Th-232
387	4741	349±96 <b>0.61±0.17</b>	4392	214.61	216.0	Th-228	Th-232

434	3180	308±78 0.54±0.14	2872	238.45	238.6	Pb-212	Th-232
441	2264	279±65 0.49±0.11	1985	242.00	241.9	Pb-214	U-238
546	4202	468±89 0.82±0.16	3734	295.23	295.2	Pb-214	U-238
658	3716	959±80 1.69±0.14	2758	351.98	351.9	Pb-214	U-238
972	11778	7928±125 13.95±0.22	3850	511	511	ANN	
1089	1488	131±53 0.23±0.09	1357	570.22	569.2	Pb(n,n')Pb	
1115	802	118±39 0.21±0.07	684	583.38	583.2	Tl-208	Th-232
1141	1592	128±55 0.23±0.10	1464	596.54		Ge(n,n')Ge	
1166	2513	581±67 1.02±0.12	1932	609.3	609.3	Bi-214	U-238
1334	1314	107±50 0.19±0.09	1207	694.20		Ge(n,n')Ge	
1549	1228	190±48 0.33±0.08	1038	802.97	803.1	Po-210 Pb(n,n')Pb	U-238
1658	1000	92±44 0.16±0.08	908	858.12	860.6	Tl-208	Th-232
1737	571	84±33 0.15±0.06	487	898.09	897.8	Pb(n,n')Pb	
1762	958	106±43 0.19±0.07	852	910.73	911.2	Ac-228	Th-232
2176	930	139±41 0.24±0.07	791	1120.25	1120.4	Bi-214	U-238
2408	499	69±30 0.12±0.05	430	1237.73	1238.8	Bi-214	U-238
2683	302	47±24 0.08±0.04	255	1377.11	1377.7	Bi-214	U-238
2848	1552	892±47 1.57±0.08	660	1460.8	1460.8	K-40	
3447	707	168±35 0.30±0.06	539	1765.24	1764.6	Bi-214	U-238

### 9.6.GmX u zaštiti od Pb+Cu+Azot

Linije korišćene za energetsku kalibraciju:

1)kanal 973-511 keV

2)kanal 2848-1460.8 keV.

Tabela 8:LB021007 (GmX u zaštiti od Pb+Cu+Azot);t=305232 s;N<sub>uk</sub>=318624 counts

I=1.044 counts/sec.

Pik kanal	Total counts	Neto $\pm\sigma$ counts counts/ksec	Bckgnd counts	E (keV)	E <sub>t</sub> (keV)	Izotop	Predak
11	2523	422 $\pm$ 68 1.38 $\pm$ 0.22	2101	23.69	24.2	In-X	
17	1608	136 $\pm$ 55 0.45 $\pm$ 0.18	1472	26.73	27.3	In-X	
55	2289	169 $\pm$ 66 0.55 $\pm$ 0.22	2120	45.98	46.5	Pb-210	U-238
88	1131	10 $\pm$ 47 0.03 $\pm$ 0.16	1121	62.69	63.3	Th-234	U-238
94	2179	273 $\pm$ 64 0.89 $\pm$ 0.21	1906	65.74	66.4 65.1	Au-X Ge(n,n')Ge Pt-X	
146	1907	197 $\pm$ 60 0.65 $\pm$ 0.20	1710	92.07	92.6	Th-234	U-238
158	3395	145 $\pm$ 82 0.48 $\pm$ 0.27	3251	98.15	97.9	Ra-223	U-235
239	3207	200 $\pm$ 79 0.66 $\pm$ 0.26	3007	139.19		Ge(n, $\gamma$ )Ge	
330	2382	127 $\pm$ 68 0.42 $\pm$ 0.22	2255	185.28	185.7 186.3	U-235 Ra-226	U-235 U-238
354	3008	252 $\pm$ 76 0.83 $\pm$ 0.25	2756	197.44	198.6	Ge-70 Ge(n, $\gamma$ )Ge-As	
434	1448	137 $\pm$ 53 0.45 $\pm$ 0.17	1311	237.96	238.6	Pb-212	Th-232
512	2542	258 $\pm$ 69 0.85 $\pm$ 0.23	2284	277.48	277.4	Tl-208	Th-232
584	1548	107 $\pm$ 55 0.35 $\pm$ 0.18	1441	313.95	314.2	Pb-214	U-238
-	-	-	-	-	351.9	Pb-214	U-238
973	5235	3445 $\pm$ 84 11.29 $\pm$ 0.27	1790	511	511 510.8	ANN Tl-208	Th-232
1140	453	44 $\pm$ 29 0.14 $\pm$ 0.09	409	595.56		Ge(n,n')Ge	
-	-	-	-	-	609.3	Bi-214	U-238
1286	548	58 $\pm$ 32 0.19 $\pm$ 0.11	490	669.55		Cu(n,n')Cu	

1330	257	$14 \pm 23$ $0.05 \pm 0.07$	253	691.84		Ge(n,n')Ge	
1548	559	$66 \pm 32$ $0.22 \pm 0.11$	493	802.27	803.1	Pb(n,n')Pb Po-210	U-238
1736	472	$71 \pm 30$ $0.23 \pm 0.10$	402	897.51	897.8 897.8	Pb-207 Tl-207	U-235 U-235
1762	321	$54 \pm 24$ $0.18 \pm 0.08$	267	910.68	911.2	Ac-228	Th-232
1863	556	$78 \pm 32$ $0.26 \pm 0.11$	478	961.84		Cu(n,n')Cu	
2167	389	$90 \pm 26$ $0.29 \pm 0.09$	299	1115.83		Cu(n,n')Cu	
2178	308	$53 \pm 24$ $0.17 \pm 0.08$	255	1121.40	1120.4	Bi-214	U-238
2848	585	$342 \pm 29$ $1.12 \pm 0.09$	243	1460.8	1460.8	K-40	
3446	148	$43 \pm 16$ $0.14 \pm 0.05$	105	1763.72	1764.6	Bi-214	U-238
4067	164	$47 \pm 17$ $0.15 \pm 0.06$	117	2078.30	2077.6 2077.2	Cu-58 Ge-77	

U sledećoj tabeli su dati odnosi između intenziteta nekih linija i kontinuma snimljenih pomoću GmX detektora bez zaštite, u Fe u Pb i u Pb+Cu+Azot zaštiti.

Tabela 8:

Linija-keV Izotop	$I_{Gb}$ counts/ksec	$I_{Gf}$ counts/ksec	$I_{Gp}$ counts/ksec	$I_{Gpcn}$ counts/ksec
I	182105.14	1735.33	1020.48	1043.87
100-120 keV	15159.98	103.42	31.65	44.96
200-220 keV	7156.49	76.15	30.69	40.41
360-380 keV	2176.32	27.00	17.12	18.93
540-560 keV	1103.76	11.67	9.46	9.43
730-750 keV	648.37	6.98	6.74	7.11
880-900 keV	491.36	5.69	5.99	5.48
1160-1180keV	390.86	3.95	3.87	3.51
1350-1370keV	187.10	2.99	3.11	2.63
1700-1720keV	62.70	1.78	2.03	1.97
1930-1950keV	59.88	1.56	1.79	1.63
185.7-U 235	$84.63 \pm 9.32$	$1.01 \pm 0.59$	$0.14 \pm 0.18$	$0.42 \pm 0.22$
238.6-Pb 212	$671.09 \pm 6.30$	$5.12 \pm 0.39$	$0.54 \pm 0.14$	$0.45 \pm 0.17$
511-ANN	$225.29 \pm 4.56$	$17.32 \pm 0.45$	$13.95 \pm 0.22$	$11.29 \pm 0.27$
911.2-Ac 228	$297.71 \pm 3.18$	$0.85 \pm 0.14$	$0.19 \pm 0.07$	$0.18 \pm 0.08$
1460.8-K 40	$1480.92 \pm 4.94$	$1.86 \pm 0.13$	$1.57 \pm 0.08$	$1.12 \pm 0.09$
1764.6-Bi 214	$153.58 \pm 1.79$	$1.70 \pm 0.13$	$0.30 \pm 0.06$	$0.14 \pm 0.05$

Linija-keV	Igb/IGF	Igb/IGP	Igb/IGPCN	IGF/IGP	IGF/IGPCN	IGP/IGPCN
I	104.94	178.45	174.45	1.70	1.66	0.98
100-120	146.59	478.99	337.19	3.27	2.30	0.70
200-220	93.98	233.19	177.10	2.48	1.88	0.76
360-380	80.60	127.12	114.97	1.58	1.43	0.90
540-560	94.58	116.68	117.05	1.23	1.24	1.00
730-750	92.89	96.20	91.19	1.04	0.98	0.95
880-900	86.36	82.03	89.66	0.95	1.04	1.09
1160-1180	98.95	101.00	111.36	1.02	1.13	1.10
1350-1370	62.58	60.16	71.14	0.96	1.14	1.18
1700-1720	35.22	30.89	31.83	0.88	0.90	1.03
1930-1950	38.38	33.45	36.74	0.87	0.96	1.10
185.7	83.79±49.81	604.50±780.06	201.50±107.86	7.21±10.19	2.40±1.89	0.33±0.54
238.6	131.07±1.62	1242.76±322.41	1491.31±563.56	9.48±2.56	11.38±4.38	1.20±0.55
511	13.01±0.43	16.15±0.41	19.95±0.63	1.24±0.04	1.53±0.05	1.24±0.04
911.2	350.25±57.81	1566.89±577.52	1653.94±735.30	4.47±1.81	4.72±2.24	1.06±0.61
1460.8	796.19±55.71	943.26±48.17	1322.25±106.34	1.18±0.10	1.66±0.18	1.40±0.13
1764.6	90.34±6.99	511.93±102.56	1097.00±391.99	5.67±1.21	12.14±4.44	2.14±0.88

Igb-intenzitet linije u GmX bez zaštite;

IGF-intenzitet linije u GmX u Fe zaštiti;

IGP-intenzitet linije u GmX u Pb zaštiti;

IGPCN-intenzitet linije u GmX u Pb+Cu+Azot zaštiti;

## 10.Zaključak

Izvršena analiza spektara je pokazala da se u fonskom spektru nalaze uglavnom samo one linije koje su se i mogle očekivati pri snimanju fona bez zaštite ili u zaštiti od Fe ili Pb. To su linije koje potiču uglavnom iz nizova Th i U a takođe i linije Cs koje potiču još od nesreće u Černobilu i linije Pb-X. Intenziteti svih linija se mogu smanjiti stavljanjem detektora u Fe zaštitu koja postoji u DFNS ili u zaštitu od Pb koja je napravljena u vreme izrade ovog diplomskog rada. Linije koje neće biti potisnute do zanemarljivog nivoa fona prilikom snimanja spektara uzoraka sa HPGe ili GmX detektorom u zaštiti se mogu identifikovati upoređivanjem sa energijama i položajem linija izotopa iz biblioteke linija i iz spektara koji su korišćeni u ovom radu.

Spektralne linije i kontinuum su najintenzivniji u spektrima snimanim bez zaštite, dok su u spektrima sa zaštitom intenziteti i preko 100 puta slabiji(po jedine linije i preko 1000 puta). Najmanji intenziteti linija su u zaštiti sa Pb+Cu+Azot, ali pojedini delovi kontinuma(na višim energijama) imaju veći intenzitet u ovoj zaštiti zbog sloja Cu(sloj koji je stavljen 1 cm je suviše debeo i trebalo bi ga zameniti tanjim ili drugim materijalom) koji je stavljen u zaštitu da bi se smanjio doprinos od linija Pb-X(ove linije se nalaze na energijama manjim od 100 keV).

U zaštiti od Pb+Cu+Azot su postradonske linije veoma slabe ili se čak uopšte ne vide kao linije 351.9 keV Pb-214 i 609.3 keV Bi-214.

## Imported from Ortec

Preset-T  
1000.000  
Stopped  
True Time  
0.000  
Live Time  
0.000  
% Dead  
100.00

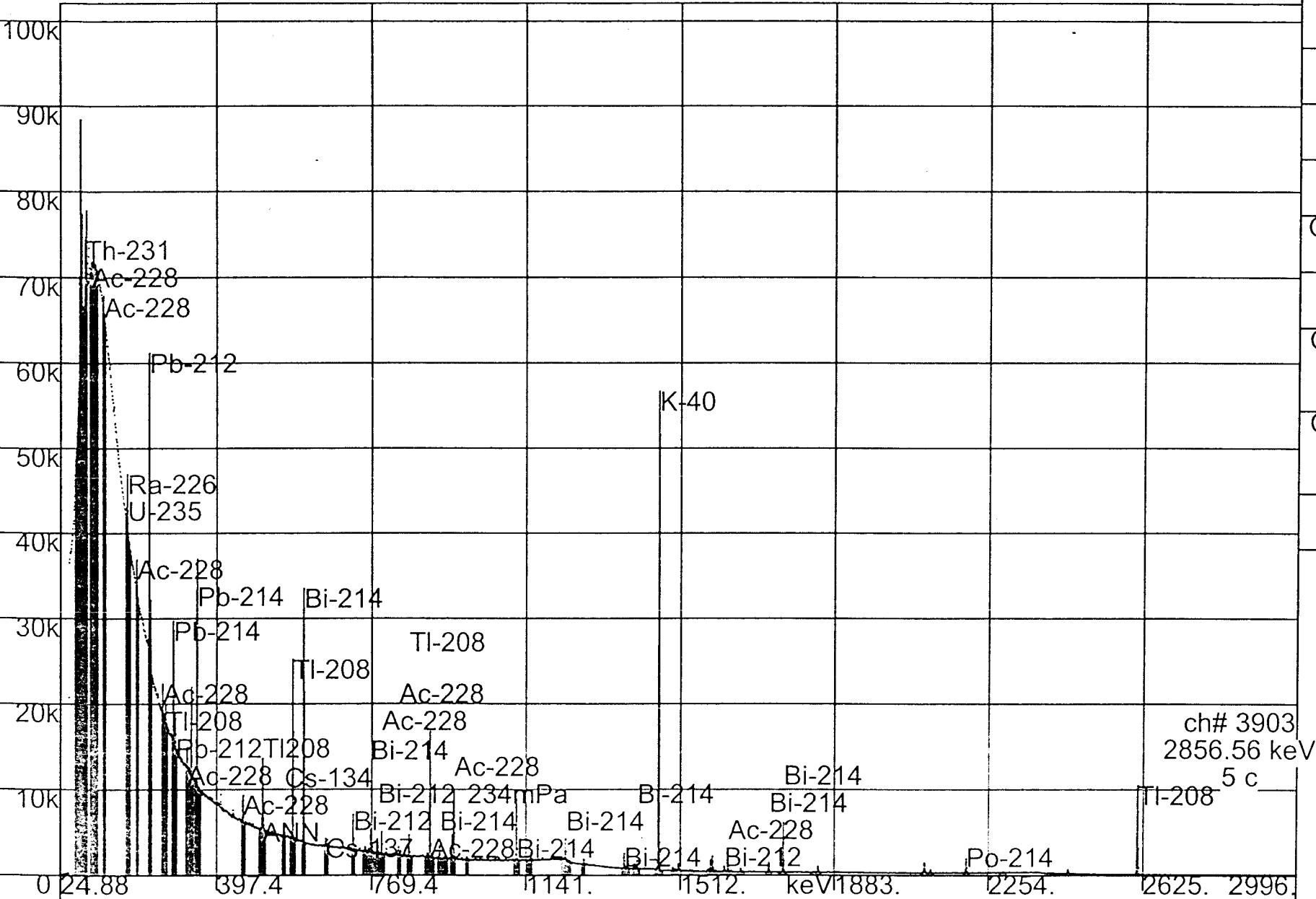
Gross Count  
21849491

Counts/sec  
0

Collect Start  
9/Oct/2002  
10:03:26

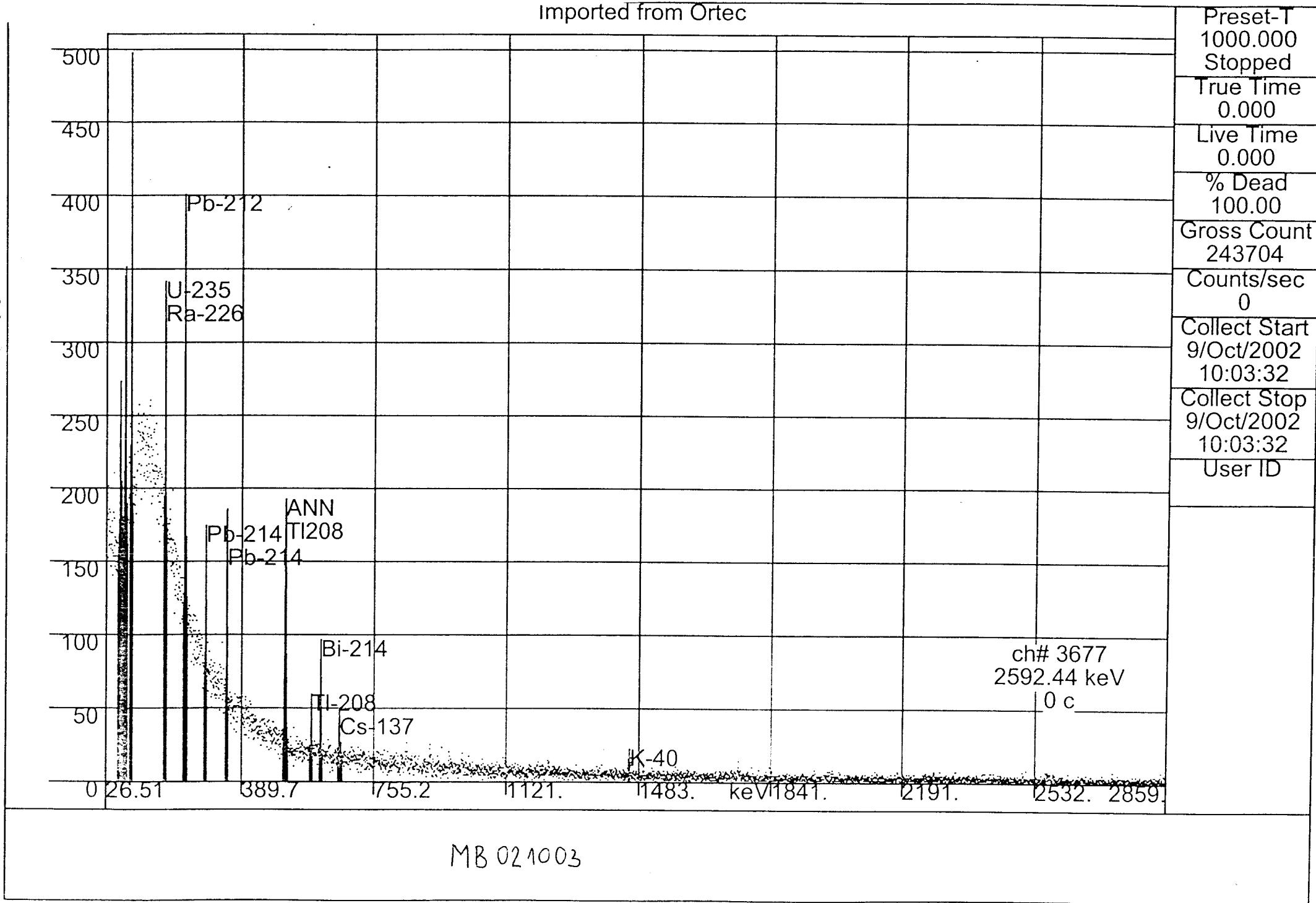
Collect Stop  
9/Oct/2002  
10:03:26

User ID



MB 020810

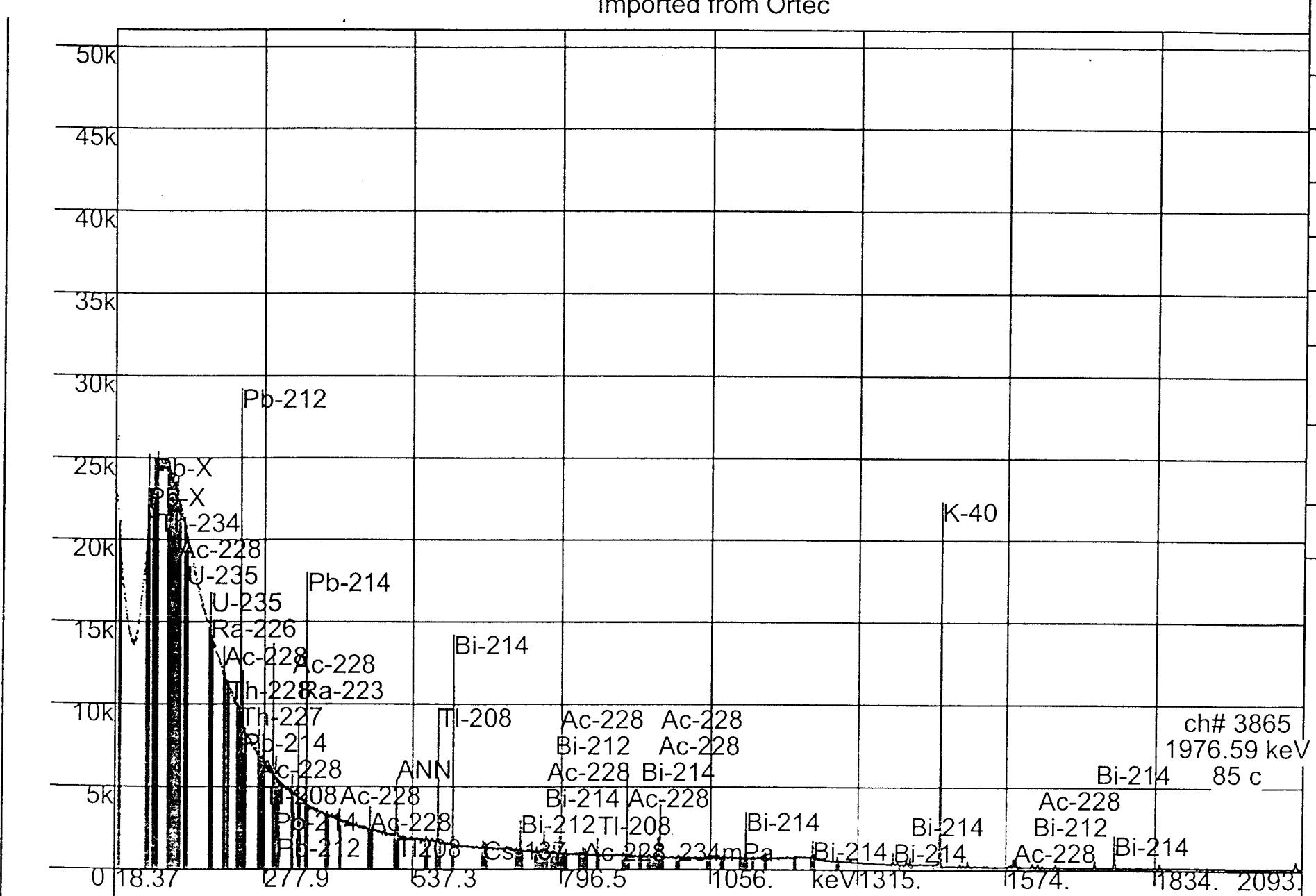
## Imported from Ortec



## Imported from Ortec

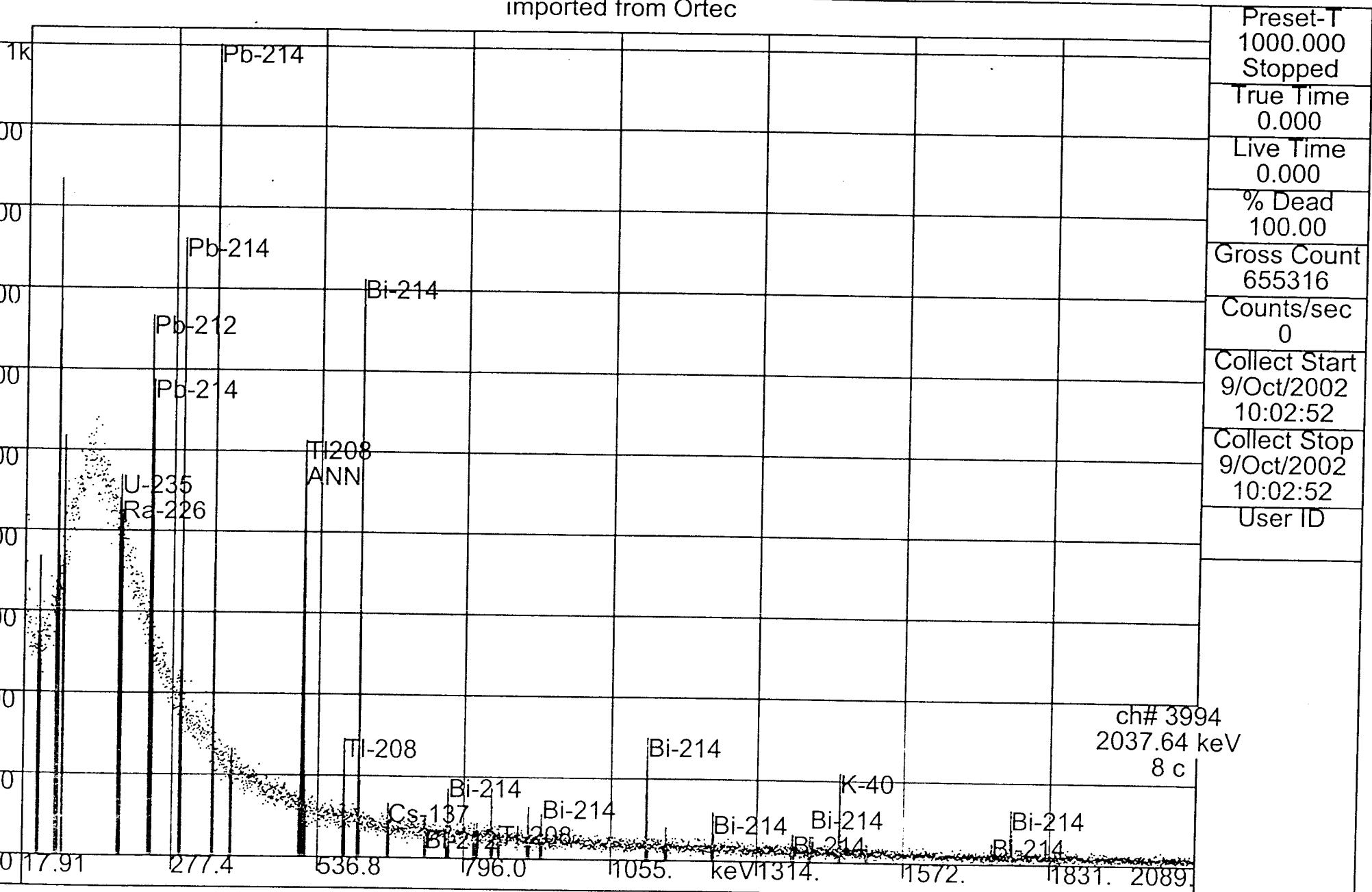
Preset-T  
1000.000  
Stopped  
True Time  
0.000  
Live Time  
0.000  
% Dead  
100.00  
Gross Count  
12077792  
Counts/sec  
0

Collect Start  
9/Oct/2002  
10:03:04  
Collect Stop  
9/Oct/2002  
10:03:04  
User ID



LB 020924

Imported from Ortec



## Imported from Ortec

Preset-T

1000.000

Stopped

True Time

0.000

Live Time

0.000

% Dead

100.00

Gross Count

1716477

Counts/sec

0

Collect Start

16/Oct/2002

9:37:20

Collect Stop

16/Oct/2002

9:37:20

User ID

Pb-X

Th-231

ANN

ch# 3828  
1959.49 keV  
27 c

18.16

278.0

537.3

796.4

1055.

keV/1315.

1575.

1835.

2096.

Th-231

Ra-226

Pb-214

Pb-212

Pb-214

Pb-214

Bi-214

Bi-214

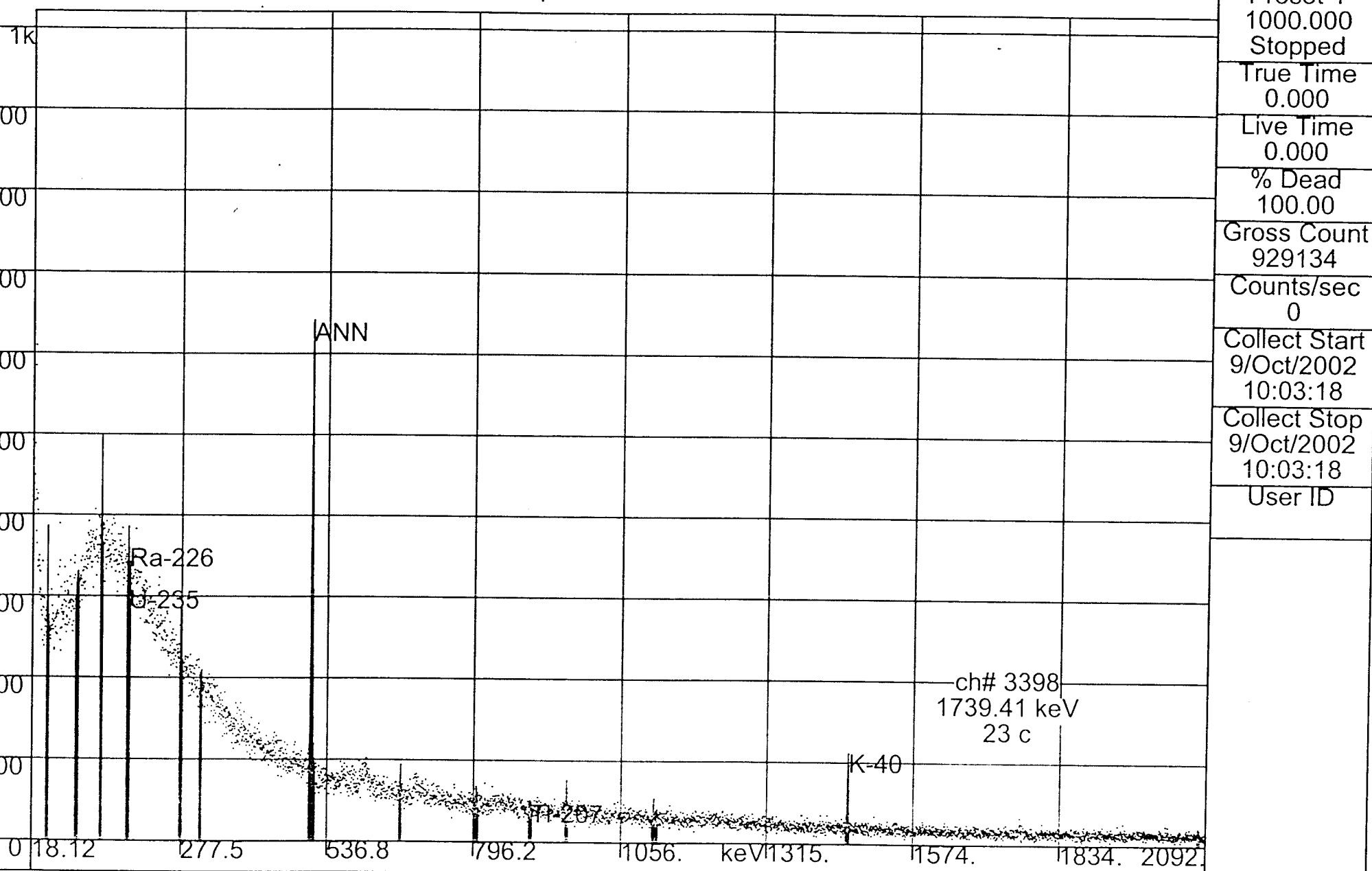
Bi-214

K-40

Bi-214

LB 021001

Imported from Ortec



LB021007

## REFERENCE

- [SLIVKA 00]- J.Slivka,I.Bikit,M.Vesković,Lj.Čonkić-GAMA SPEKTROMETRIJA,  
specijalne metode i primene,Univerzitet u Novom Sadu ,2000.
- Páll Theodórsson-Measurment of WEAK RADIOKIVITY,Science Institute,University of  
Iceland,1996.
- Leo,W.R.-Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments,Springer-Verlag,Berlin  
Heidelberg,New York,1994.
- E.Browne,R.B.Firestone-Table of Radioactive Isotopes,Lawrence Berkeley Laboratory,  
University of California,1986.
- D.Mrđa-Diplomski rad,Novi Sad,2001.

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

Redni broj:	Mesto i adresa:PMF,Trg D.Obradovića
RBR	4,21000 Novi Sad
Identifikacioni broj:	MA
IBR	Fizički opis rada:
Tip dokumentacije:	FO
TD	Naučna oblast:Fizika
Tip zapisa:Tekstualni štampani materijal	NO
TZ	Naučna disciplina:Nuklearna fizika
Vrsta rada:Diplomski rad	ND
VR	Predmetna odrednica/ključne reči:
Autor:Hansman Jan 246/96	Germanijum,fon,gama-spektrometrija
AU	PO
Mentor:Dr Ištvan Bikit	Čuva se:biblioteka Departmana za
MN	fiziku,PMF,Novi Sad
Naslov rada:Redukcija fona primenom Fe i	ČU
Pb zaštite	Važna napomena:
NR	VN
Jezik publikacije:Srpski (latinica)	Izvod:
JP	IZ
Zemlja publikovanja:Jugoslavija	Datum prihvatanja teme od strane veća:
ZP	DP
Uže geografsko područje:Vojvodina	Datum odbrane:
UGP	DO
Godina:2002/2003	Članovi komisije:
GO	Predsednik:Dr Jaroslav Slivka
Izdavač:Autorski reprint	Članovi:Dr Radomir Kobilarov
IZ	Dr Ištvan Bikit-mentor
	KO