

TARTU ÜLIKOOL  
Füüsika-keemiateaduskond  
Keskkonnanüüsika instituut

KADRI ISAKAR  
**KIIRGUSLEVI MONTE CARLO MEETODID EFEKTIIVSUSE  
KORRIGEERIMISEKS <sup>210</sup>Pb GAMMASPEKTROMEETRIAS**

Magistritöö keskkonnanüüsikast

Juhendaja: Enn Realo, f. m. k.,  
TÜ Füüsika Instituut, vanemteadur

Tartu 2006

## SISUKORD

<b>1</b>	<b>SISSEJUHATUS</b> .....	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>GAMMASPEKTROMEETRIAST HPGE DETEKTORITEGA</b> .....	<b>5</b>
	GERMAANIUMDETEKTORI TÖÖPÕHIMÕTE.....	5
	OLULISEMAD KARAKTERISTIKUD .....	6
	DETEKTORI TUNDETU KIHIT .....	7
	OMANEELDUMINE .....	7
<b>3</b>	<b>EFEKTIIVSUSE PARANDAMISE MEETODID</b> .....	<b>9</b>
	GESPECOR .....	9
	TEOREETILISED MUDELID .....	10
	<i>Ketasdetektor ja silindriline ruumallikas</i> .....	10
	<i>Punktdetektor ümbritsetuna ruumallikast</i> .....	11
	MONTE CARLO MEETODID GEANT4 NÄITEL .....	13
	<i>Geant4</i> .....	13
	<i>Monte Carlo meetodid</i> .....	14
<b>4</b>	<b>GEANT4 FÜÜSIKALISED PROTSESSID MADALATEL ENERGIATEL</b> .....	<b>16</b>
	OLULISEMAD FÜÜSIKALISED PROTSESSID .....	17
	FOTOELEKTRILINE EFEKT .....	18
	COMPTONI HAJUMINE .....	19
<b>5</b>	<b>UURITAVAD OBJEKTID</b> .....	<b>21</b>
	RGU-1 .....	21
	AEROSoolIFILTRID .....	21
<b>6</b>	<b>SIMULATSIOON</b> .....	<b>23</b>
	TARKVARALISED DETAILID .....	23
	GEOMEETRIA .....	24
	FÜÜSIKALISED PROTSESSID JA PRIMAARSÜNDMUSE GENEREERIMINE .....	27
<b>7</b>	<b>DETEKTORI TUNDETU KIHII PAKSUSE MÄÄRAMINE</b> .....	<b>30</b>
<b>8</b>	<b>AEROSoolIFILTRITE EFEKTIIVSUSED JA <sup>210</sup>PB AKTIIVSUSED</b> .....	<b>33</b>
	EFEKTIIVSUSED .....	33
	<i>Harku</i> .....	35
	<i>Narva-Jõesuu</i> .....	36
	<i>Tõravere</i> .....	36
	<i>Footonite neeldumisest</i> .....	39
	AKTIIVSUSED .....	42
<b>9</b>	<b>KOKKUVÕTE</b> .....	<b>46</b>
<b>10</b>	<b>SUMMARY</b> .....	<b>47</b>
	EFFICIENCY CALIBRATION IN GAMMASPECTROMETRY USING MONTE CARLO METHODS .....	47
<b>11</b>	<b>KASUTATUD KIRJANDUS</b> .....	<b>48</b>
<b>LISA 1</b> .....		<b>51</b>
	VÄLJUND .....	51
	MÕÕTEGEOMEETRIA KONSTRUEERIMINE JA KASUTATAVAD FÜÜSIKALISED PROTSESSID .....	55
	<i>DetectorConstruction.cc</i> .....	55
	<i>PhysicsList.cc</i> .....	62
<b>LISA 2</b> .....		<b>64</b>

## 1 SISSEJUHATUS

Germaaniumdetektorite abil tehtav gamma-spektrometriaalne analüüs on üks osa elukeskkonna radioaktiivsuse seirest. Konkreetse radionukliidi sisaldust õhus, pinnases või mujal tuntakse aktiivsuse kontsentratsioonina ning mõõdetakse bekerelides (Bq). Aktiivsus on defineeritud kui ajaühikus toimuvate radioaktiivsete lagunemiste arvu ooteväärtus ja sellega on vahetult seotud ainet kiiratud gammakiirguse footonite arv. Keskkonnas, sh Eesti tingimustes, on üheks oluliseks mõõdetavaks radionukliidiks  $^{210}\text{Pb}$  (Realo jt, 2006; Lust ja Realo, 2005), mis kiirgab 46,5 keV energiaga gammafootoneid. Niisuguse väikese energiaga footoneid kiirgava radionukliidi aktiivsuse hindamisel tekivad aga suured määramatused. Kuna keskkonnaproovid on reeglina ruumilised, siis on olulisemaid gamma-spektrometriaalset analüüsi tulemusi muutuvalt nähtusi omaneeldumine ja proovi geometria (suurus, kuju, paigutus). Omaneeldumiseks nimetatakse gammafootonite neeldumist proovis nii, et nad detektori kristallini ei jõua ja jäävad registreerimata. Omaneeldumise arvestamiseks leitakse fotojoone parandatud efektiivsus, mille kaudu on võimalik täpsemini hinnata konkreetse radionukliidi aktiivsust.

Efektiivsuse parandamiseks on mitmesuguseid meetodeid (vt ülevaade, Isakar, 2004). Käesolevas töös on lühidalt käsitletud poolempiirilist arvutusmeetodit programmi Gespecor näitel, ruumallika – ketasdetektori ja proovist ümbritsetud punktdetektori mudelid ning kiirguslevi täielikku Monte Carlo simulatsiooni (teekide kogumi Geant4 näitel) realistliku silindrilise ruumallika ja detektori jaoks. Pearõhk ongi pandud viimasele, esimesed täidavad võrdlusmeetodite osa.

Loetletud meetodeid on rakendatud kolmest Eesti seirejaamast (Harku, Narva-Jõesuu, Tõravere) pärinevatele aerosoolifiltritele ning IAEA referentsallikale RGU-1. Teoreetilisi arvutusi võrreldakse mõõdetutega, kusjuures võrdlusallikat on mõõdetud kolmes erinevas geometrias – proovi kõrgustel 6,4; 12,1 ja 26 mm ning konstantse tihedusega. Õhufiltrite mõõtmisel on iga proovi korral olemas ligikaudu sama massiga filtritükk, mis pressitakse standardse suurusega mõõtetopsi. Niisugusel meetodil jääb proov topsis reeglina erineva kõrgusega, seega erineva tihedusega.

Efektiivsuse parandusi saab leida sõltuvalt proovi kõrgusest. Monte Carlo simulatsioonid on igast seirejaamast pärit filtrite jaoks koostatud nii mõõdetud kõrgustega kui ka Gespecori abil arvatud (Isakar, 2004) ehk võrdlusallika kõrgustega geomeetriaate jaoks. Parandatud efektiivsuse sõltuvuse kaudu proovi kõrgusest on leitud aerosoolifiltrite aktiivsused, mis jagatuna filtrit läbinud õhu hulgaga annavad tulemuseks õhu radioaktiivsuse hinnangu.

## 2 GAMMASPEKTROMEETRIAST HPGe DETEKTORITEGA

Käesolevas töös kasutatavad mõõtetulemused on saadud planaarse tüüpi ülipuhta germaaniumi (edaspidi HPGe) detektoriga GPD-50400 komplekteeritud gammaspetsimeetri MULTISPECTRUM (Baltic Scientific Instruments, Läti) abil. Vedela lämmastiku temperatuurini jahutatuna (vältimaks soojuslikku müra) muudab HPGe detektor röntgen- ja gammakiirguse elektriliseks signaaliks. Nimetatud detektori tootja poolt avalikustatud andmed on näha tabelis 1 (Baltic Scientific Instruments, 2003).

**Tabel 1. Tootja (BSI) andmed planaarse HPGe detektori GPD-50400 kohta (Baltic Scientific Instruments, 2003).**

Mõõtepiirkond (energiavahemik), keV	3 – 1500
Energialahutusvõime, eV	
5,9 keV juures	570
59,6 keV juures	610
Detektori tundliku ala kaugus sisendaknast, mm	6
Detektori paksus, mm	15
Detektori tundliku ala pindala, mm <sup>2</sup>	2000
Be sisendakna paksus, µm	300
Detektori tööpinge, V	2400

Planaarse geomeetriaga HPGe detektor kujutab endast silindrilist germaaniumi monokristalli, mille ala- ja ülaküljele on sadestatud elektriline kontakt (üks neist n- ja teine p-tüüpi). Õhukese tundetu, nn „surnud” kihi tõttu sobivad need koaksiaalsetest p-tüüpi detektoritest (Debertin ja Helmer, 1988) paremini madalate energiatega (kuni 100 keV) mõõtmiseks. Samas saab planaarse detektorite suhteliselt lihtsama valmistamistehnoloogia tõttu valida neid mitmes erinevas paksuses ning mõõta edukalt ka suuremaid energiasid.

### **Germaaniumdetektori tööpõhimõte**

Footoni interaktsioonil aatomiga tekitatakse vabu elektrone – pooljuhist germaaniumi elektronid liiguvad valentstsoonist juhtivustsooni. Ühe elektroni juhtivustsooni viimiseks vajalik energia sõltub materjalist, germaaniumi puhul on see 0,67 eV. Siiski kulub vaba elektron-aukpaari tekitamiseks tegelikult keskmiselt 2,96 eV, kuna elektron ning auk

kohtuvad oma teel kristallvõre teiste aatomitega ning kaotavad osa energiat foononinteraktsioonidel (nn Fano faktor). Tekkinud paaride loendamiseks rakendatakse germaaniumkristallile pinge, mille tulemusena augud kogunevad p- ning elektronid n-kontaktile. Kuna elektronide ja aukude aines liikumise kiirus on erinev, siis täpsema tulemuse saamiseks loendatakse mõlemale kontaktile viidud laenguid. Mida suurem on germaaniumi kristallile rakendatud pinge, seda efektiivsem on laengukorje. Kuna elektron-aukpaare tekitatakse väga palju ning sekundaarsed elektronid võivad igaüks tekitada veel hulga uusi elektron-aukpaare, on nende kõigi kokku kogumiseks piisav pinge suurusjärgus 1000 V. Laengute korje huvides pinget suurendades tuleb siiski silmas pidada, et liiga kõrge pinge korral muutub germaanium ka footonite abita juhtivaks – tekib läbilöök (Debertin ja Helmer, 1988). Soovituslik tööpinge on tavaliselt antud detektori tootja poolt, GPD-50400 puhul on see 2400 volti (tabel 1). Väike elektron-aukpaari tekitamise energia soodustab pooljuhtdetektorite kõrget energialahutusvõimet, sest gammafootoni poolt tekitatud paaride suur arv mõjutab otseselt detektori väljundis saadava laengusignaali statistilist täpsust. Näiteks, footon energiaga 45 keV tekitab ligikaudu 15000 elektron-aukpaari ja laengusignaali suuruse suhteline määramatus on seega  $1/\sqrt{15000} = \pm 0,8\%$ . Müra vähendamiseks on ülipuhtas germaaniumis viidud lisaainete kontsentratsioon väga madalaks, kuni  $10^{10}$  aatomit kuupsentimeetri kohta. Soojusest tingitud elektron-aukpaaride tekke vältimiseks peab HPGe detektor töötamise ajal olema jahutatud vedela lämmastiku või muude meetodite abil temperatuurini  $\sim 100$  K (Knoll, 1989).

### **Olulisemad karakteristikud**

Tähtsaimateks detektorit iseloomustavateks suurusteks on efektiivsus ning joone kogulaius poolel kõrgusel (edaspidi FWHM) ehk energialahutusvõime (Debertin ja Helmer, 1988).

Fotoelektrilise efekti tagajärjel moodustunud koguenergia joone ehk fotojoone efektiivsuseks nimetatakse allikast väljunud footonite ning joone moodustanud footonite arvu suhet. Efektiivsus sõltub footoni energiast ning täpsemalt avaldub see konkreetse fotojoone jaoks järgnevalt:

$$\varepsilon = \frac{N}{\tau A f} C_i, \quad (1)$$

kus  $N$  on aja  $\tau$  jooksul kogutud lugemite arv,  $A$  tähistab konkreetse radionukliidi aktiivsust ning  $f$  väljendab footoni kiirgumise tõenäosust, mis  $^{210}\text{Pb}$  46,5 keV fotojoone korral on 4,25%.  $C_i$  on erinevad parandustegurid ( $i = 1, 2, \dots$ ), mis arvestavad mõõtmisel nn surnud aega, radionukliidi lagunemist, juhuslikku ja kointsidentssummeerimist, omaneeldumist allikas ja allika ning detektori vahel olevates ainetes. Sisuliselt näitab ülaltoodud valemi järgi arvutatud efektiivsus, kui palju potentsiaalselt tekkinud footonitest detektor registreerida suudab. Planaarset tüüpi detektorite efektiivsus on reeglina koaksiaalsete omast parem, kuna esimestes on elektrivälja kogu pooljuhi vaesumisala ulatuses ühtlasem (Debertin ja Helmer, 1988; Knoll, 1989).

FWHM väärtust võib umbkaudu hinnata teades detektori tüüpi ja mõõtmeid. Täpne suurus oleneb aga konkreetsest detektorist ja on enamasti ka tootja poolt jagatud andmetes kirjas. Põhiliselt oleneb FWHM detektori materjalis elektron-aukpaaride tekitamiseks vajalikust energiast, kuid olulisel määral ka konkreetse detektori võimest laenguid koguda ja elektroonika poolt põhjustatud müra (Debertin ja Helmer, 1988).

### **Detektori tundetu kiht**

Tundetu ehk nn surnud kiht on olemas igal HPGe detektoril. Selle paksus võib olla aga väga erinev, tihti ka sama detektori pinna piires (Dowdall, 2005). Peamine tundetu kihi tekkimise põhjus on detektori ülapinnal paiknev lõpliku paksusega elektriline kontakt. Kristallile sadestatud kontakt võib tekitada mitmesaja mikromeetri paksuse surnud kihi, kuid alla 100 keV footonite jaoks tähendab see juba märgatavat efektiivsusekadu. Õhemate juhtivate kontaktide saamiseks viiakse ioonpommitamise meetodil suure kiirusega liikuvad aatomid germaaniumkristalli pealmisesse kihti. Tulemuseks võib olla vaid kümnendiku mikromeetri paksusega kontakt, mis ei sega ka väga väikese energiaga footonite mõõtmist (Knoll, 1989).

### **Omaneeldumine**

Omaneeldumiseks nimetatakse gammafootoni osalist või täielikku neeldumist kiirgusallikas endas (Debertin ja Helmer, 1988). Punkt- ja pindallikate korral niisugust probleemi praktiliselt ei teki. Keskkonnaproovid on reeglina aga ruumilised ning radionukliidid on ümbritsetud sama elemendi stabiilsete isotoopidega või hoopis teiste

materjalidega. Teel kiirgavast aatomituumast detektorini võib foton osa oma energiast maha jätta või enne detektorit täielikult ära neelduda. Sellisel juhul ei registreerita antud fotonist pärinevat energiat sajaprotsendiliselt või üldse mitte ning ta ei osale fotojoone moodustamises. Neeldumist saab arvesse võtta, kasutades prooviga identse geomeetria, tiheduse ja keemilise koostisega kalibratsiooniallikat. Keskkonnaproovid on enamasti äärmiselt erinevad, varieerudes muldadest ja turbast tehismaterjalist valmistatud aerosoolifiltriteni. Ka käesolevas töös kõne all olevad õhufiltrid, isegi pärinedes samast mõõtejaamast, on iga kord pisut erinevalt mõõtetopsi kokkusurutud. Seega on iga keskkonnaproov unikaalne. Osa geomeetriaid on küll üksteisele lähendatavad, kuid erinevaid geomeetriaid on siiski liiga palju ja kõigi jaoks ei ole kalibratsiooniallikat mõttekas valmistada. Kalibratsiooniallika ning mõõdetava proovi erinevuste arvesse võtmiseks leitakse parandustegurid ehk antud juhul koguenergiajoone efektiivsuse sõltuvus proovi tihedusest ehk kergemini mõõdetavast kõrgusest, kuna silindrilise proovi diameeter on konstantne.

Gammakiirguse neeldumist aines iseloomustatakse neeldumise lineaar- ( $\mu_l$ , ühikuna kasutatakse  $\text{cm}^{-1}$ ) või massikoeffitsiendiga ( $\mu_m$ , ühikuks  $\text{cm}^2/\text{g}$ ). Need sõltuvad läbitava materjali elementkoostisest ja footoni energiast, lineaarne neeldumiskoeffitsient lisaks veel aine tihedusest. Teades uuritava materjali keemilist koostist, võib neeldumiskoeffitsiendi leida vastavast tabelist või andmebaasist (näiteks: NIST, 2005), muul juhul tuleb koeffitsient määrata eksperimentaalselt. Lõpuks ainest väljuvate fotonite arv  $N$  ajaühikus avaldub kitsa kiirtekimbu puhul

$$N = N_0 \exp(-\mu t), \quad (2)$$

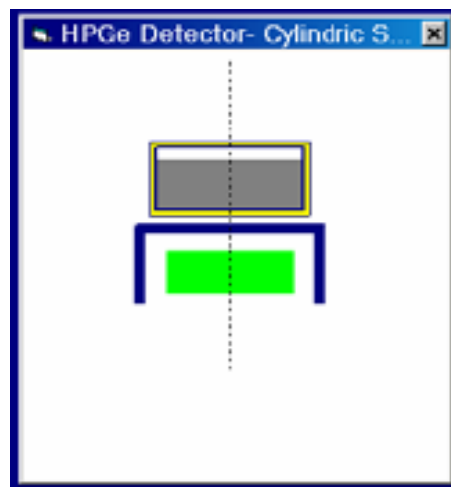
kus  $N_0$  on esialgne gammakiirguse intensiivsus ja  $t$  tähistab läbitud ainekihi paksust ühikutes  $\text{cm}$  (kui  $\mu$  tähistab lineaarset neeldumiskoeffitsienti) või  $\text{g}/\text{cm}^2$  (kui  $\mu$  on massineeldumiskoeffitsient) (Debertin ja Helmer, 1988; Sima, 1997).

### 3 EFEKTIIVSUSE PARANDAMISE MEETODID

Efektiivsusele omaneeldumist arvestavate parandustegurite leidmiseks on mitmeid meetodeid. Käesolevas töös võrreldakse programmiga Gespecor (tootja: MATec GmbH) arvutatud, kahe teoreetilise mudeli abil leitud ja Monte Carlo meetodeid kasutava teekide kogumiga Geant4 saadud tulemusi.

#### Gespecor

Gespecor (MATec GmbH, 1999; Isakar, 2004) tarkvara on loodud arvutamaks parandustegureid omaneeldumise ja kointsidentssummeerimise efektidele HPGe detektoritega sooritatavas gammaspektrometrias. Parandustegurite leidmiseks kasutab Gespecor Monte Carlo meetodeid ühendatuna eksperimendi ja/või proovi ning detektori andmetega. Käesolevas töös võrreldakse varem välja töötatud meetodi (Isakar, 2004) abil arvutatud efektiivsuse väärtusi  $^{210}\text{Pb}$  45,6 keV fotojoone jaoks teistsugustel viisidel leitud. Lühidalt selgitatuna on kasutatud meetod järgnev.



Joonis 1. Gespecori näide: planaarne HPGe detektor krüostaadis (roheline, sinises ümbrises) silindrilise prooviga (hall, kollases mõõteanumas).

Kuna uuritava materjali keemiline koostis ei olnud teada, leiti selle omaneeldumiskoeffitsient eksperimentaalselt. Sisestades Gespecori valiku Modified algandmetesse võrdlusmaterjali (kalibratsiooniallika RGU-1) keemilise koostise ja tiheduse, detektori parameetrid (mõõtmed, ümbritsevad materjalid) ning mõõdetud proovi neeldumiskoeffitsiendi oli võimalik arvutada referentsmaterjali neeldumiskoeffitsient,

võrdlus- ja uuritava materjali neeldumiskoeffitsientide ( $F_{a0}$  ja  $F_{a1}$ ) ning viimaste kaudu otsitav parandustegur:

$$F_{ca} = \frac{F_{a1}}{F_{a0}}. \quad (3)$$

Efektiivsus uuritava proovi jaoks leitakse sel juhul kalibratsiooniallika efektiivsuse ja parandusteguri korrutisest.

Meetodi heaks küljeks on, et ei ole vaja uuritava proovi materjalist ja sama tihedusega kalibratsiooniallika, piisab geomeetria kokkulangemisest. Keskkonnaproovide jaoks eriti sobiv on võimalus uuritava aine kohta sisestada vaid eksperimentaalselt määratud neeldumiskoeffitsient ja tihedus, pööramata tähelepanu täpsele keemilisele koostisele, mis niisuguste katseobjektide puhul ei ole enamasti teada.

## **Teoreetilised mudelid**

### Ketasdetektor ja silindriline ruumallikas

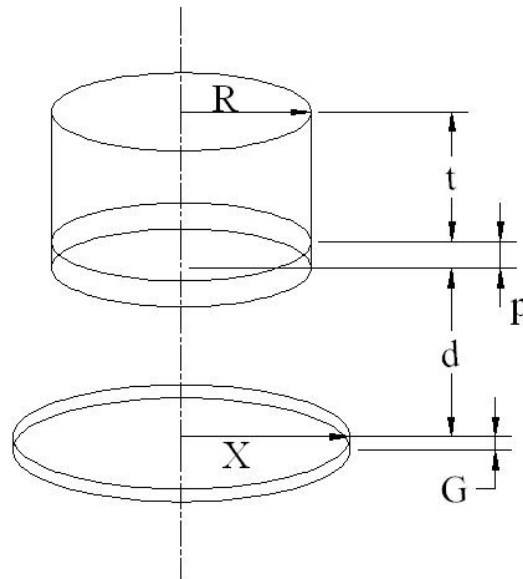
Esimeseks teoreetiliseks efektiivsuse hindamiseks näiteks toon ühisel teljel asuvate ruumallika ning ketasdetektori mudeli (joonis 2), mida kasutades on võimalik leida efektiivne ruuminurk  $\Omega$ , mis jagatuna  $4\pi$  annab koguefektiivsuse  $\varepsilon_i$ :

$$\varepsilon_i = \frac{\Omega}{4\pi} = \frac{1}{\pi R^2 t} \left[ \int_0^t \int_0^X \int_0^\pi \int_0^R \frac{\exp\left(\frac{-z \cdot (\mu\tau + \mu_g G + \mu_p p)}{d + \tau}\right) \cdot r(d + \tau)x}{z^3} dr d\phi dx d\tau \right], \quad (4)$$

kus

$$z = \sqrt{r^2 - 2rx \cdot \cos \phi + x^2 + (d + \tau)^2}.$$

Integreeritakse üle proovi raadiuse ( $R$ ), detektori raadiuse ( $X$ ), proovi paksuse ( $t$ ) ja nurga  $\phi$  (nurk raadiuste vahel allikas ja detektoris), mis muutub  $0 \dots \pi$ .  $d$  tähistab proovi kaugust detektorist,  $p$  mõõteanuma seina paksust ning  $\mu$ ,  $\mu_g$  ja  $\mu_p$  on vastavalt proovi, germaaniumi ja mõõteanuma seina lineaarneeldumiskoeffitsiendid.  $G$  märgib germaaniumikristalli tuntetu kihi paksust. Kui lineaarneeldumiskoeffitsiendid on antud ühikutes  $\text{cm}^{-1}$ , tuleb teistel suurustel mõõtühikuna kasutada sentimeetrit.



**Joonis 2. Ühel teljel asuvad ruumallikas ja ketasdetektor. R - allika raadius, t - allika kõrgus, p - mõõtetopsi põhja paksus, d - proovi ja detektori vaheline kaugus, G - germaaniumikristalli "surnud" kihi paksus, X - detektori raadius.**

Võttes arvesse, et fotoelektrilise efekti ja kogunõrgenemise ristlõigete suhe  $^{210}\text{Pb}$  46,5 keV fotojoone jaoks on 0,968 (NIST, 2005), saame arvutada fotojoone efektiivsuse

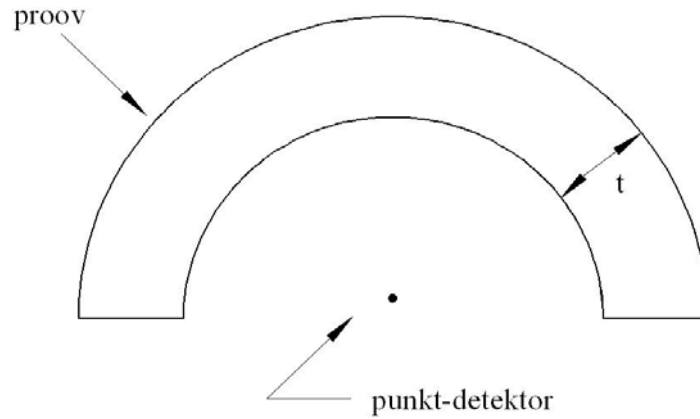
$$\varepsilon = 0,968 \cdot \varepsilon_t \quad (5)$$

#### Punktdetektor ümbritsetuna ruumallikast

Teiseks teoreetiliseks valemiks, mis võrdluses osaleb, on punktdetektori ning seda poolkaarena ümbritseva ruumilise proovi mudelile (joonis 3) vastav efektiivsuse omaneeldumise parandi avaldis:

$$\varepsilon = \frac{1 - e^{-\mu t}}{\mu t} \quad (6)$$

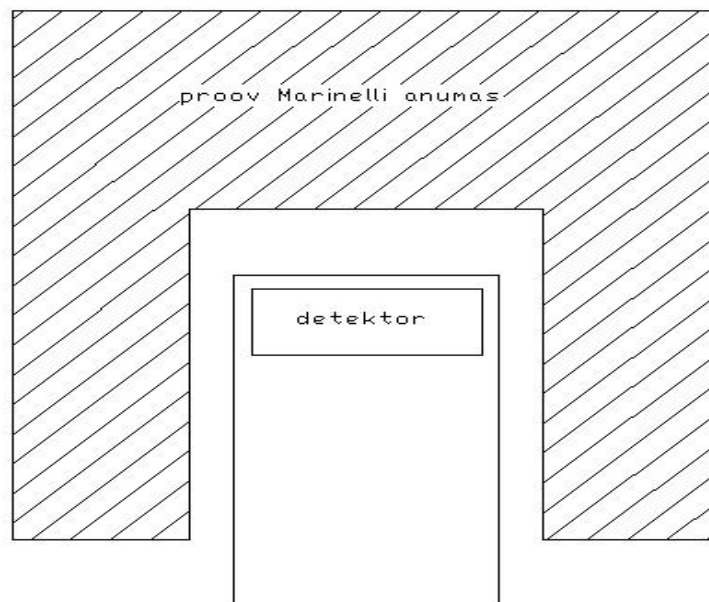
kus  $t$  on proovi paksus ja  $\mu$  tähistab neeldumiskoeffitsienti.



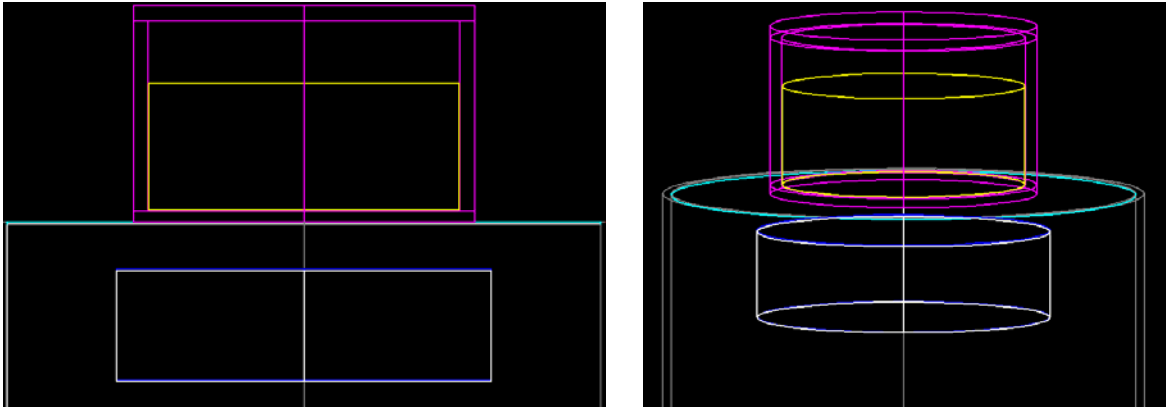
**Joonis 3. Punktdetektor ruumilise prooviga.**

Tegemist on lihtsaima efektiivsuse hindamiseks kasutatava valemiga ning realselt sobib see kõige paremini nn Marinelli geometria (joonis 4) kirjeldamiseks, kus detektor on peaaegu igast küljest mõõdetava prooviga ümbritsetud. Käesolevas töös kasutatud mõõtmistulemused on saadud detektori kohal asuvate silindriliste proovide abil (joonis 1, joonis 5) ning lähendades valemit (6) võrdlusallika RGU-1 mõõtmisel saadud efektiivsustele, tuleb lisada parandustegurid  $a$  (RGU-1 korral väärtusega 0,122) ja  $b$  (0,525).

$$\varepsilon = \frac{a[1 - e^{-(b+\mu)t}]}{(b + \mu)t} \quad (7)$$



**Joonis 4. Mõõtegeomeetria ristlõige Marinelli anumaks kutsutava proovikonteineri korral.**



Joonis 5. Uuritav mõõtegeomeetria (Geant4). Roosa tähistab mõõteanumat, kollane proovi. Valge silinder tähistab germaaniumkristalli tundlikku ala.

### Monte Carlo meetodid Geant4 näitel

Monte Carlo meetoditel põhinevad simulatsioonid on reeglina täpseimad, mida üldse on võimalik saavutada. Määramatuste vähendamiseks tuleb aga üsna suur hulk võimalikke toimuvaid protsesse läbi mängida ning seetõttu on Monte Carlo arvutuste aeg tavaliselt suhteliselt pikk. Käesolevas töös esindab Monte Carlo meetoditel põhinevat tarkavara Geant4 – avatud lähtekoodiga C++ programmeerimiskeeles kirjutatud teekide kogum simuleerimaks iga üksiku gammafootoni või osakese tasemel teekonda ja detailseid leviprotsesse läbi aine.

### Geant4

Geant4 (kaitstud BSD litsentsiga (freshmeat.net, 2006; OSI, 2006)) on FORTRAN keeles kirjutatud ning seetõttu kohmakaks muutunud Geant3 paindlikum edasiarendus. Objektorienteeritud programmeerimiskeeles teekide kogumi loomise idee sündis aastal 1993 nii CERNis (Euroopa Tuumauuringute Keskus, Šveits) kui ka KEKis (Kõrge Energia Kiirendite Uurimisorganisatsioon, Jaapan). Praegu vastutab Geant4 edasiarendamise eest Geant4 Collaboration.

Geant4 suur pluss on universaalsus, kasutaja saab ise valida kogu simuleeritavat mõõteprotsessi puudutava informatsiooni (Geant4 võrguleht, 2006):

- mõõtmisaparatuuri ja uuritava proovi geomeetria;
- erinevad materjalid;
- algündmuse ja primaarse osakese genereerimise;
- osakese interaktsioone hõlmavad füüsikalised protsessid;

- protsessides osalevad sekundaarosakesed;
- osakeste jälgimise nende teekonnal läbi ainete ja elektromagnetväljade;
- detektori tundliku ala ja selle koste;
- trajektooride salvestamise, visualiseerimise ja soovi korral ka analüüsi.

Simulatsiooniprogrammi tekitamiseks tuleb kasutajal koostada mitmeid klasse: detektori geometria iseloomustamiseks (materjalid, tundlikud piirkonnad jne), primaarosakese genereerimiseks (osakese tüüp, energia, asukoht, suunajaotus) ja defineerimaks asjassepuutuvad osakesed ning füüsikalised protsessid. Selleks on tarvis veidi aimu objektorienteeritud programmeerimise põhimõtetest. Samas just C++ kasutamise tõttu on Geant4 väga universaalne abivahend äärmiselt erinevate simulatsioonide koostamisel.

Geant4 ühendab endas Monte Carlo meetodeid, erinevaid kõrge energia füüsika mudeleid ning eksperimentaalseid andmeid. Praeguseks kasutatakse Geant4 tuuma- ja meditsiinifüüsikas, kiirendite simuleerimisel ning kosmoseuuringutel (Geant4 võrguleht, 2006; Geant4 Collaboration, 2003). Geant4 on kasutatud ka näiteks HPGe detektorite efektiivsuse kalibratsiooniks (Hurtado, 2004) ja omaneeldumise parandustegurite hindamiseks (Pilleyre, 2006).

### Monte Carlo meetodid

Monte Carlo on üldine nimetus tervele reale numbrilistele meetoditele, mis põhinevad juhuslike (piisab ka pseudojuhuslikest) arvude genereerimisel. Muuhulgas võimaldavad need meetodid simuleerida kõiki footoni või muu osakese teel ette tulevaid füüsikalisi protsesse. Gammafootoni kiirgumisele radionukliidist järgneb pikk tee detektorini, mille jooksul osake astub vastastikmõjusse ümbritseva ning lõpuks ka detektori ainega, tekitades sel viisil sekundaarosakesi, mille liikumist tuleb omakorda jälgida. Kuna ühtegi lihtsustust ei tehta, pole ei allika ega detektori geometrial piiranguid ning simulatsiooni korratakse kuni statistiline määramatus saab väiksemaks 1 %-st (Wikipedia, 2006; Kollo, 2004; Geant4 User's Documents, 2005b).

Geant4 kasutab kahe Monte Carlo meetodi – segu- ja valikumeetodi kombinatsiooni. Simuleerimaks juhuslikku suurust  $X$  kasutatakse segumeetodis (Kollo, 2004) juhuslikke

suurusi  $Y_1, \dots, Y_k$ . Lühidalt öelduna on suurus  $X$  tõenäosusega  $g_i$  võrdne juhusliku suurusega  $Y_i$ , kus

$$\begin{aligned} g_i &\in (0,1) \\ \sum_{i=1}^k g_i &= 1 \end{aligned} \quad (8)$$

Valikumeetodi heaks jooneks on võimalus simuleerida ka juhuslikke vektoreid (Kollo, 2004). Geant4 kasutatav kombinatsioon seisneb lühidalt järgnevas. Oletame, et me soovime saada  $x$  väärtust vahemikus  $[x_1, x_2]$  normeeritud tõenäosustiheduse funktsiooni

$$f(x) = \sum_{i=1}^n N_i f_i(x) g_i(x) \quad (9)$$

korral, kus  $N_i > 0$ ,  $f_i(x)$  on normeeritud jaotusfunktsioonid  $[x_1, x_2]$  jaoks ja  $0 \leq g_i(x) \leq 1$ .

Sellisel juhul käitume järgnevalt:

1. valime juhusliku täisarvu  $i \in \{1, 2, \dots, n\}$  tõenäosusega, mis on võrdeline suurusega  $N_i$ ;
2. valime mingi suuruse  $x_0$  jaotusfunktsioonist  $f_i(x)$ ;
3. arvutame  $g_i(x_0)$  ja määrame selle tõenäosuseks, et  $x = x_0$ ;
4. kui  $x_0$  ei kiideta heaks, pöördume tagasi punkti 1 juurde.

Niisuguse skeemi kasutamisel on selgunud, et keskmine proovimiste arv, mis rahuldava tulemuse saamiseni viib on  $\sum_i N_i$  (Geant4 User's Documents, 2005b).

#### 4 GEANT4 FÜÜSIKALISED PROTSESSID MADALATEL ENERGIATEL

Käesoleva töö raames valmis simulatsiooniprogramm, mis kasutab Geant4 füüsikaprotsesside valikut madalate energiatega jaoks koostatuid (Apostolakis jt, 1999; Amako jt, 2005). Viimaste hulka kuuluvad:

- fotoelektriline efekt (klassist G4LowEnergyPhotoElectric),
- Comptoni hajumine (klassist G4LowEnergyCompton),
- Rayleigh' hajumine (klassist G4LowEnergyRayleigh),
- gammakonversioon (klassist G4LowEnergyGammaConversion),
- pidurduskiirgus (klassist G4LowEnergyBremsstrahlung) ja
- ionisatsioon (klassist G4LowEnergyIonisation).

Madala energiaga osakestega toimuvaid elektromagnetilisi protsesse kirjeldavate lisaklasside loomise üheks põhjuseks on asjaolu, et selles piirkonnas hakkab suurt rolli mängima aatomkihi struktuur ning aatomi elektronkihtide jaoks tuleb kasutada erinevaid vastastikmõju ristlõike väärtusi. Nii on elementides aatomnumbriga  $Z = 1 \dots 99$  võimalik realistlikult simuleerida isegi 250 eV energiaga osakesi, samas kui ülemine energiapiir küünib saja GeV juurde. Iga protsessi korral kasutatakse simuleerimiseks nii teoreetilisi mudeleid kui ka eksperimentaalseid andmeid arvutamaks ristlõikeid ning lõppolekuid. Eksperimentaalsed andmed pärinevad avalikest andmebaasidest (Red Cullen's Homepage, 2005) EPDL97 (footonite jaoks), EEDL (elektronide jaoks) ning EADL (aatomite andmed), mis on Geant4-ga ühildumiseks ümberkujundatud. Lisaks kasutab Geant4 tabeleid pidurdusvõime ning seoseenergiatega kohta. Andmebaasidega kaetud energia piirkond on 1 eV kuni 1 GeV-ni Rayleigh' ja Comptoni hajumise korral, madalaima seoseenergiaga iga elemendi korral fotoefekti ja ionisatsiooni jaoks ning 10 eV-ni pidurduskiirguse jaoks. Nende abil leiab Geant4 madala energia simulatsioonideks vajalikud lähteandmed:

- fotoelektrilise efekti, Comptoni hajumise, Rayleigh' hajumise, gammakonversiooni ja pidurduskiirguse koguristlõiked;
- integreeritud elektronkihtide ristlõiked fotoelektrilise efekti ja ionisatsiooni jaoks;
- elektronprotsesside sekundaarosakeste energiaspektri;
- Comptoni efekti hajumisfunktsioonid;
- Rayleigh' hajumise form-faktorid;

- elektronide seoseenergiad kõikide alakihtide jaoks;
- siirde tõenäosuse elektronikihtide vahel fluorestsentsi ja Auger' efekti jaoks;
- pidurdusjõu tabelid.

Vastavalt Geant4 füüsikaalasele käsiraamatule (Geant4 User's Documents, 2005b) leitakse koguristlõike arvutamiseks andmebaasidest vajalikule energiale lähim madalam ( $E_1$ ) ja kõrgem ( $E_2$ ) energia, mille jaoks ristlõike väärtused (vastavalt  $\sigma_1$  ja  $\sigma_2$ ) andmebaasis olemas on, ning interpoleeritakse järgmise valemi järgi:

$$\log(\sigma(E)) = \frac{\log(\sigma_1)\log(E_2/E) + \log(\sigma_2)\log(E/E_1)}{\log(E_2/E_1)}. \quad (10)$$

Selle kaudu arvutatakse osakese jaoks keskmine vabatee pikkus kuni interakteerumiseni konkreetses protsessis:

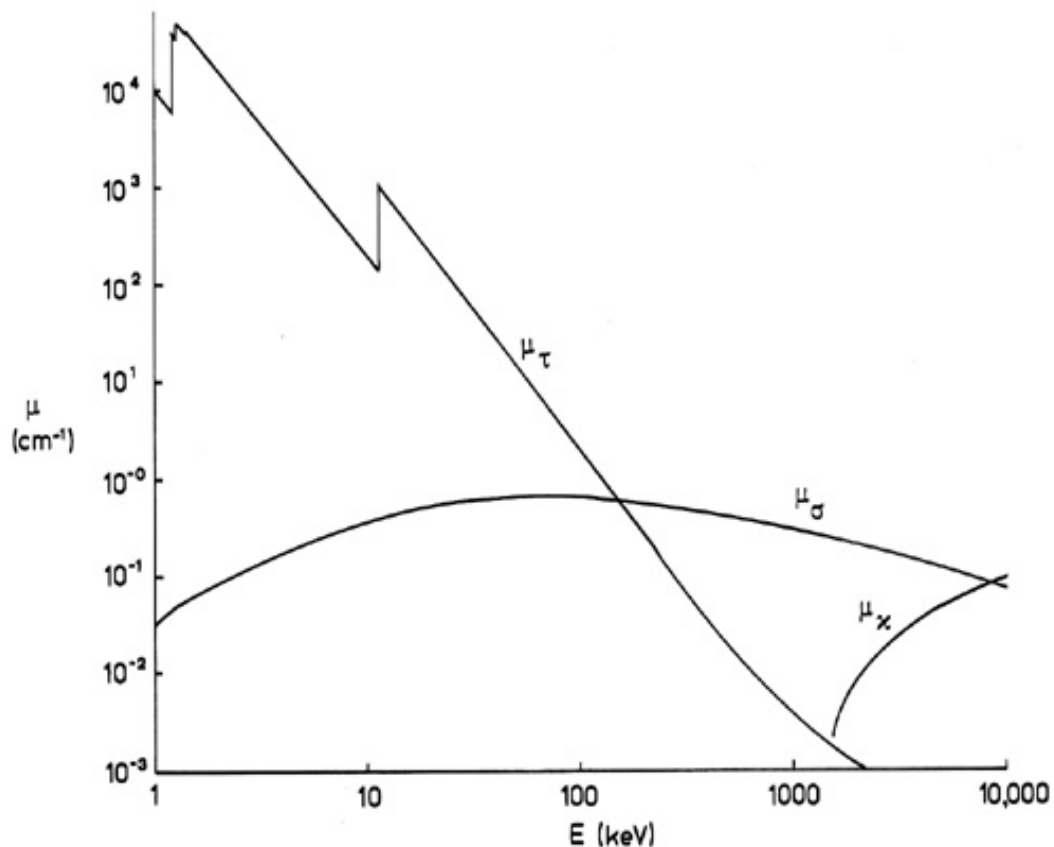
$$\lambda = \frac{1}{\sum_i \sigma_i(E) \cdot n_i}. \quad (11)$$

Siin summeeritakse üle kõigi elementide,  $E$  on osakese energia ja  $n_i$  on  $i$ -nda elemendi aatomtihedus materjalis.

Protsessi lõppoleku genereerimiseks valitakse materjalist juhuslik aatom, milles interaktsioon toimub ja simuleeritakse aatomi ergastuse äraandmine. Vajalikud füüsikalised suurused, näiteks sekundaarosakeste energia ja nurkjaotus, leitakse mudelitest või andmebaasidest. Kasutaja poolt defineeritud energialävest allpool ei vaadelda potentsiaalselt tekitatud sekundaarosakesi osakestena, vaid ühtlase energiakaona.

### **Olulisemad füüsikalised protsessid**

46,5 keV energiaga  $^{210}\text{Pb}$  fotojoone simuleerimisel on olulisemateks füüsikalisteks protsessideks fotoelektriline efekt, Comptoni hajumine ja pidurduskiirgus. Gammakonversiooni nii madala energia juures praktiliselt ei esine ja Rayleigh' hajumine muudab koguneeldumist vaid õige vähe.



Joonis 6. Erinevatest protsessidest tingitud neeldumise lineaarkoefitsientide osakaalud germaaniumi korral sõltuvalt footoni energiast.  $\mu_\tau$  tähistab neeldumist fotoelektrilise efekti tõttu,  $\mu_\sigma$  märgib Comptoni hajumist ning  $\mu_\kappa$  paaride teket (Debertin ja Helmer, 1988).

### Fotoelektriline efekt

Käsitletava energia puhul on domineerivaks interaktsiooniks fotoelektriline efekt. Fotoelektrilise efekti käigus interakteerub gammafooton seotud elektroniga, tulemusena antakse tavaliselt ära kogu footoni energia. Madalate energiatega korral pidurdub elektron üsna ruttu ümbritsevas materjalis. Samuti jäävad enamasti aineist väljumata siseelektronita aatomi poolt kiiratud röntgenkiirgus või Auger' elektronid. Nii neeldubki kogu esialgse footoni energia läbitavas aines ja detektoris moodustub koguenergia- ehk fotojoon. Fotoelektrilise efekti ristlõike leidmiseks teatud footoni energia  $E_\gamma$  ja läbitava elemendi aatomnumbri  $Z$  korral ühest teoreetilist valemit pole, kuid ligikaudne hinnang on leitud (Debertin ja Helmer, 1988):

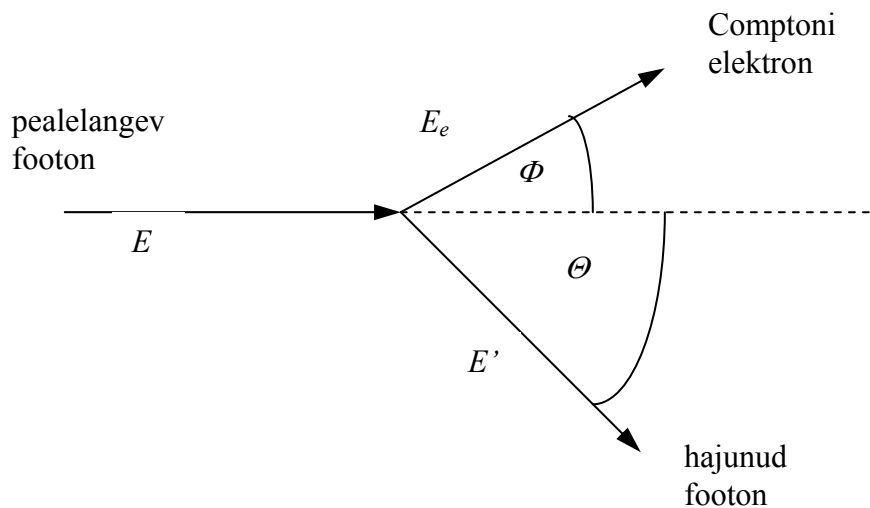
$$\sigma = const \cdot Z^{4,5} \cdot E_\gamma^{-3}. \quad (12)$$

Geant4 leiab madala energiaga footoni fotoelektrilise efekti ristlõike valemi (10) kohaselt interpoleerimise teel kasutades EPDL97 (Evaluated Photon Data Library) andmebaasi. Vastavalt kõikide alakihtide jaoks leitud ristlõigetele valitakse juhuslik kiht, millest

elektron välja lüüakse, kusjuures elektroni liikumissuunaks saab esialgse footoni suund. Seejärel simuleeritakse aatomi naasmine põhiolekusse ning sekundaarkiirgus (Auger' elektronid või pidurduskiirgus) kasutades EADL (Evaluated Atomic Data Library) andmebaasi, mis sisaldab üleminekutõenäosusi elementide  $Z = 1 \dots 100$  kõigi elektronide jaoks (Geant4 User's Documents, 2005b).

### Comptoni hajumine

Comptoni hajumisel interakteerub foton suhteliselt nõrgalt seotud elektroniga (footoni energia  $\gg$  seoseenergiast), kuid annab elektronile ära vaid osa oma energiast, tekitades sekundaarfootoni ja -elektroni. Hajunud footoni ( $E'$ ) ja elektroni ( $E_e$ ) energiad on jäävusseaduste tõttu seotud hajumisnurkadega  $\Theta$  ja  $\Phi$ .



Joonis 7. Comptoni hajumine.

Comptoni hajumise ristlõike avaldub aine aatomnumbri  $Z$  ja footoni energia  $E_\gamma$  jaoks ligikaudselt (Debertin ja Helmer, 1988):

$$\sigma = const \cdot Z \cdot E^{-1}. \quad (13)$$

Geant4 leiab madala energiaga fotonite Comptoni hajumise ristlõike valemi (10) järgi. Protsessi lõppoleku simuleerimiseks lisab Geant4 Monte Carlo meetodites kasutatavale valikufunktsioonile  $g(\alpha)$  hajumisfunktsiooni  $SF(q)$ , mis muutub madalatel energiatel eriti oluliseks:

$$g(\alpha) = \left[ 1 - \frac{\alpha}{1 + \alpha^2} \sin^2 \theta \right] \times SF, \quad (14)$$

kus  $0 < g(\alpha) < Z$ . Hajumisfunktsiooni väärtused iga liikumishulga  $q = E \times \sin^2(\Theta/2)$  siirde korral saadakse antud aatomnumbri  $Z$  jaoks andmebaasis olemasolevate suuruste interpoleerimise teel. Footoni hajumisnurk  $\Theta$  tuletatakse Monte Carlo meetodite abil leitud  $\alpha$  väärtusest, kusjuures  $\alpha$  on hajunud footoni ja pealelangenu footoni energiatega suhe  $E'/E$  (Geant4 User's Documents, 2005b).

## 5 UURITAVAD OBJEKTID

### RGU-1

RGU-1 on Kanada Mineraal- ja Energia Tehnoloogia Keskuse (lühemalt CANMET) poolt valmistatud Rahvusvahelise Aatomienergia Agentuuri (IAEA) etalonmaterjal kalibreerimaks gammaspektromeetreid nende efektiivsuse, tundlikkuse ja lahutusvõime kontrollimiseks. RGU-1 keemiline koostis on toodud tabelis 2 (IAEA Analytical Quality Control Services).

Tabel 2. RGU-1 keemiline koostis.

Element	Massiprotsent
Si	46,4
U	0,04
Al	0,1
Fe	0,03
Ca	0,03
Na	0,02
C	0,01
Mg	0,01
Pb	0,008
K	0,002
Ti	0,008
S	0,002
Th	< 1 µg/g

Etalonallikas on garanteeritud uraani sisaldus  $400 \pm 2,1$  µg/g, mis on ekvivalentne uraanirea tasakaalulise aktiivsuse kontsentratsiooniga  $4975 \pm 25$  Bq/kg, nii sisaldab see materjal kõiki uraanirea tütarprodukte (IAEA Analytical Quality Control Services).

### Aerosoolifiltrid

Vaatluse all on kolmest seirejaamast pärinevad aerosoolifiltrid – Harkust, Narva-Jõesuust ja Tõraverest. Kiirguskeskuse andmetel (Kiirguskeskus, 2004) võib filtrite kohta öelda järgmist:

- Harkus kasutatakse FPP tüüpi filtreid, millest pumbatakse läbi õhku umbes 2000 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>. Geograafilised koordinaadid: 59° 23' 50" põhjalaiust (N) ja 24° 35' 58" idapikkust (E).
- Narva-Jõesuus on kasutusel klaaskiudfiltrid, mida läbib igas tunnis 900 m<sup>3</sup> õhku. Geograafilised koordinaadid: 59° 27' 46" N ja 28° 02' 45" E.
- Tõraveres pumbatakse õhku läbi klaaskiudfiltri 150 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>. Geograafilised koordinaadid on 58° 15' 53" N ja 26° 27' 42" E.

Kõikide filtrite ekspositsiooniaeg on ligikaudu üks nädal.

## 6 SIMULATSIOON

### Tarkvaralised detailid

Käesolevas töös on simulatsiooniprogrammi koostamiseks kasutatud Geant4 versiooni 7.1.p01 (Geant4.7.1 Release Notes, 2005). Toetatud operatsioonisüsteemid on SUN Solaris 5.8 (kompilaatoriks: C++ CC-5.4 Patch 111715-02 või ka C++ CC-5.5), Linux (gcc-3.2.3 või ka versioonid gcc-3.4.3, gcc-3.4.4 ja gcc-4.0.0 või Intel-icc 8.0) ja Windows XP (vajalikud CygWin Tools ja Visual C++ 7.1 .NET). Lisaks MacOS 10.3, MacOS 10.4 kompilaatoritega vastavalt gcc-3.3 ja gcc-4.0.

Geant4 simulatsiooni matemaatilist osa toetab CLHEP (inglise keeles: A Class Library for High Energy Physics; idee autor Leif Lönnblad; samuti BSD litsentsiga), mis sisaldab endas klasse juhuslike arvude generaatorite, vektorite, geomeetriliste kujundite ja algebra tehete (CLHEP, 2005). Geant4.7.1.p01 ühildub CLHEP versioonidega 1.9.2.1 ja 1.8.1.0. Tulemuste töötlemiseks, graafikute ja histogrammide koostamiseks soovitatakse AIDA (inglise keeles: Abstract Interfaces for Data Analysis) versiooni 3.2.1 (AIDA, 2005).

Käesoleva töö raames on operatsioonisüsteemina kasutusel GNU/Linux, Fedora Core 4. Kompilaatoriks on gcc-4.0.2 ja CLHEP versioon 1.9.2.1. Histogrammid on joonistatud Mathcad 2001i abil.

Simulatsiooniprogrammi koostamisel lähtusin Geant4 näidetest (Geant4 User's Documents, 2005a) ning ainsast seni Eestis valminud tööst (Hektor jt, 2005). Iga simulatsiooniprogramm koosnes järgnevatest klassidest:

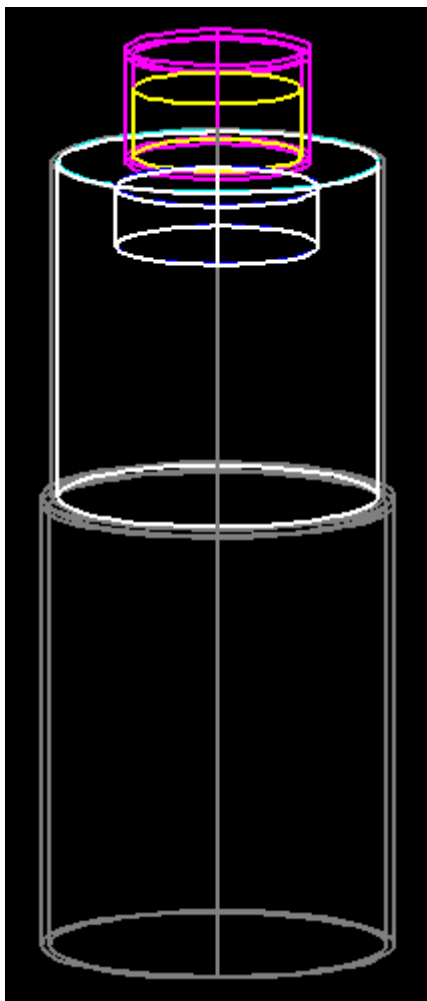
- Peaklass (simulatsiooni\_nimi.cc) peameetodiga.
- *DetectorConstruction* kirjeldamaks detektori ja proovi geomeetriat: materjal, kuju, mõõtmed, asetus üksteise suhtes, detektori tundliku ala defineerimine, visualiseerimisatribuutide (nähtavus, värv) määramine. Materjalide defineerimisel tuleb ette anda elementkoostis aatomite arvu või massiprotsendi kaudu ja tihedus.
- *DetectorHit* ja *DetectorSD* tegelevad detektorisse jäänud energia loendamisega.
- *EventAction* ja *EventActionMessenger*, mis juhivad iga sündmuse (Geant4 terminoloogias *Event*) käiku.

- *RunAction*, mis tegeleb iga konkreetse footoni tekitamisele järgnevate protsesside haldamisega.
- *SteppingAction* ja *SteppingVerbose* – jälgimaks protsesside sammupikkusi ja liikumist erinevate objektide vahel.
- *VisManager* – registreerib programmid, mille formaadis on võimalik tekitada sündmustest pilt. Käesoleval juhul on visualiseerimiseks kasutatud programmi Wired3 (WIRED3 User's Home Page, 2005).
- *PhysicsList* – määrab ära kasutatavad füüsikalised protsessid, nendes osalevad osakesed ja sekundaarosakeste tekitamiseks vajalikud lävendid.
- *PrimaryGeneratorAction*, kus genereeritakse primaarosake, antud juhul gammafooton energiaga 46,5 keV, juhusliku suunavektoriga ning juhusliku algpositsiooniga proovi koordinaatide piires.

## Geomeetria

Mõõtegeomeetria on defineeritud klassis *DetectorConstruction* koosnevana järgmistest osadest:

- Õhuga täidetud ümbritsev ruum, Geant4 mõistes *World*.
- Detektori GPD-50400 Ge-kristalli ümbritsev krüostaadi silindriline alumiiniumkorpus 11,2 cm kõrguse (seina paksus 0,2 cm) ala- ja 8,1 cm kõrguse (seina paksus 0,15 cm) ülaosaga.
- Ümbrise ülapinnal asuv 0,03 cm paksune Be-aken.
- Alumiiniumkorpuses on vaakum, milles asub silindriline germaaniumkristall diameetriga 5 cm ja kõrgusega 1,5 cm. Kristalli kaugus Be-aknast on 0,6 cm.
- Be-akna peal asub polüstüreenist (koostise definitsioon siinkohal: 7,741 % (massiprotsent) vesinik, 92,259 % süsinik) silindriline mõõteanum: välisdiameeter 5 cm ja –kõrgus 2,9 cm, põhja paksus on 0,15 cm, seintel ja kaanel – 0,2 cm.
- Mõõteanumas asuva proovi välisdiameetriks on 4,18 cm.



**Joonis 8. Geant4 simulatsioonis defineeritud m ootegeomeetria. Hall – kr ostaadi alumiiniumkorpus, suurem valge silinder (halli osa sees) - vaakumina defineeritud ala, väiksem valge silinder - detektori tundlik ala, roosa - m ooteanum, kollane - mõõdetav proov.**

Simuleeriti gammafootonite neeldumist kolme erineva kõrgusega (0,64; 1,21 ja 2,60 cm) referentsallikas RGU-1, üheksa kõrgusega Harku, kuue kõrgusega Narva-Jõesuu ning viie erineva kõrgusega Harku m oõtejaamast pärit aerosoolifiltrites. Filtrite simuleerimisel on kolmel juhul kasutatud samu proovik orgusi, mis RGU-1 korral, võrdlemaks tulemusi programmi Gespecor abil leitud efektiivsustega.  lej aanud filtrik orgused on saadud konkreetsetest m oõteandmetest (Harku proovidel 1,4; 1,7; 1,8; 2,0; 2,2 ja 2,3 cm, Narva-Jõesuu puhul 1,0; 1,7 ja 2,3 cm, Tõravere filtritel 0,3 ja 0,4 cm). Kõikide proovide tihedused on leitud massi ja lineaarm oõdete kaudu:

$$\rho = \frac{mass}{\pi \cdot raadius^2 \cdot kõrgus} \quad (15)$$

Erinevalt referentsallikast RGU-1 ei ole filtrite täpne keemiline koostis teada ning arvutisimulatsiooni jaoks on seetõttu leitud tõetruud lähendused kasutades avalikkusele kättesaadavat infot FPP filtrite ja erinevate klaaside elementsisalduste kohta ning eksperimentaalselt määratud neeldumiskoeffitsiente.

Harku seirejaama FPP-tüüpi filtri simulatsioonis on koostisena defineeritud polüvinüülkloriid ( $C_2H_3Cl$ )<sub>n</sub>. Nimetatud ühendi neeldumiskoeffitsient on Rahvusliku Standardite ja Tehnoloogia Instituudi (National Institute of Standards and Technology, tuntud kui NIST) andmetel 0,476 cm<sup>2</sup>/g (siin ja edaspidi ei arvestata koherentset hajumist) (NIST, 2005). Harkust pärit aerosoolifiltriproovide jaoks on eksperimentaalselt leitud neeldumiskoeffitsiendiks  $0,56 \pm 0,06$  cm<sup>2</sup>/g, seega võib niisugust keemilist koostist lähendina kasutada küll.

Narva-Jõesuust ja Tõravereest pärinevate õhufiltrite mudelina sai kõigepealt kasutatud ränidioksiidi SiO<sub>2</sub> kui klaaside peamist koostisosa. NIST andmebaasi järgi ei ühti aga ränidioksiidi neeldumiskoeffitsient eksperimentaalselt leituga – esimene neist on 0,315 cm<sup>2</sup>/g, teine aga Narva-Jõesuu ja Tõravere õhufiltrite korral keskmiselt  $1,29 \pm 0,15$  cm<sup>2</sup>/g. Osutus, et sobiva neeldumiskoeffitsiendiga oleks niinimetatud pliiiklaas (flint) ehk klaas, mille koostises on vähemalt 4% pliioksiidi. Lisaks pliioksiidile ja ränidioksiidile sisaldavad klaasid tavaliselt veel alumiiniumoksiidi (räni ebapuhtusena) ning kaaliumi või naatriumi okside (sulamistemperatuuri langetamiseks). Arvutisimulatsiooni koostamisel defineeriti filtri materjal Narva-Jõesuu ja Tõravere proovide jaoks järgmiselt (massiprotsendid): 82% SiO<sub>2</sub>, 12% PbO, 4% Na<sub>2</sub>O ja 2% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Niisuguse aine neeldumiskoeffitsient 46,5 keV juures on NIST andmetel 1,27 cm<sup>2</sup>/g.

Näide aerosoolifiltri materjali defineerimisest klassis *DetectorConstruction*:

```
// vajalikud keemilised elemendid
G4Element* elO = new G4Element("Oxygen", "O", z=8., a=16.00*g/mole);
G4Element* elSi = new G4Element("Silicon", "Si", z=14.,
a=28.0855*g/mole);
G4Element* elPb = new G4Element("Lead", "Pb", z=82., a=207.2*g/mole);
G4Element* elNa = new G4Element("Sodium", "Na", z=11., a=22.9898*g/mole);
G4Element* elAl = new G4Element("Aluminium", "Al", z=13.,
a=26.98*g/mole);

// vajalikud oksiidid, koostis defineeritud aatomite arvu kaudu
```

```

G4Material* SiO2 = new G4Material("SiO2", density=2.533*g/cm3,
ncomponents=2);
SiO2->AddElement(elSi, natoms=1);
SiO2->AddElement(elO, natoms=2);

G4Material* PbO = new G4Material("PbO", density=9.350*g/cm3,
ncomponents=2);
PbO->AddElement(elPb, natoms=1);
PbO->AddElement(elO, natoms=1);

G4Material* Na2O = new G4Material("Na2O", density=2.270*g/cm3,
ncomponents=2);
Na2O->AddElement(elNa, natoms=2);
Na2O->AddElement(elO, natoms=1);

G4Material* Al2O3 = new G4Material("Al2O3", density=4.000*g/cm3,
ncomponents=2);
Al2O3->AddElement(elAl, natoms=2);
Al2O3->AddElement(elO, natoms=3);

// filtri materjali tiheduse arvutamine
G4double paksus = FilterH, raadius = FilterR,
           pindala = raadius*raadius*3.14;
G4double mass = FilterMass;
FilterDensity = mass/(paksus*pindala);

// õhufiltri materjal
// koostis erinevate materjalide massiprotsentide kaudu
G4Material* PbGlass = new G4Material("Pb glass", FilterDensity,
ncomponents=4);
PbGlass->AddMaterial(SiO2, 82.*perCent);
PbGlass->AddMaterial(PbO, 12.*perCent);
PbGlass->AddMaterial(Na2O, 4.*perCent);
PbGlass->AddMaterial(Al2O3, 2.*perCent);

```

Väljundis on ülaldefineeritud materjali info näidatud järgnevalt:

```

Material: Pb glass      density: 613.289 mg/cm3  temperature: 273.15 K
pressure:  1.00 atm  RadLength:  32.517 cm
  ---> Element: Silicon (Si)  Z = 14.0  N = 28.1  A = 28.09 g/mole
fractionMass: 38.33 % Abundance 30.37 %
  ---> Element: Oxygen (O)   Z = 8.0   N = 16.0  A = 16.00 g/mole
fractionMass: 46.51 % Abundance 64.69 %
  ---> Element: Lead (Pb)    Z = 82.0  N = 207.2  A = 207.20 g/mole
fractionMass: 11.14 % Abundance  1.20 %
  ---> Element: Sodium (Na)  Z = 11.0  N = 23.0  A = 22.99 g/mole
fractionMass:  2.97 % Abundance  2.87 %
  ---> Element: Alumiinium (Al)  Z = 13.0  N = 27.0  A = 26.98
g/mole fractionMass:  1.06 % Abundance  0.87 %

```

### Füüsikalised protsessid ja primaarsündmuse genereerimine

Nagu juba öeldud, järgivad simuleeritud footonid madala energiaga osakestele kohandatud elektromagnetiliste protsesside käiku. Kasutatavate protsesside kirjeldamine toimub

*PhysicsList* klassis:

```

if (particleName == "gamma") {
// gammafootoni interakteerumise viisid
lowePhot = new G4LowEnergyPhotoElectric("LowEnergyPhotoElectric");
pmanager->AddDiscreteProcess(new G4LowEnergyRayleigh);
pmanager->AddDiscreteProcess(lowePhot);
pmanager->AddDiscreteProcess(new G4LowEnergyCompton);
pmanager->AddDiscreteProcess(new G4LowEnergyGammaConversion);
} else if (particleName == "e-") {
//elektronile rakendatavad protsessid
loweIon = new G4LowEnergyIonisation("LowEnergyIoni");
loweBrem = new G4LowEnergyBremsstrahlung("LowEnBrem");
pmanager->AddProcess(new G4MultipleScattering, -1, 1, 1);
pmanager->AddProcess(loweIon, -1, 2, 2);
pmanager->AddProcess(loweBrem, -1, -1, 3);
}

```

Esmane osake ehk käesoleval juhul 46,5 keV energiaga gammafoton, selle stardipositsioon ning liikumissuund määratakse klassis *PrimaryGeneratorAction*:

```

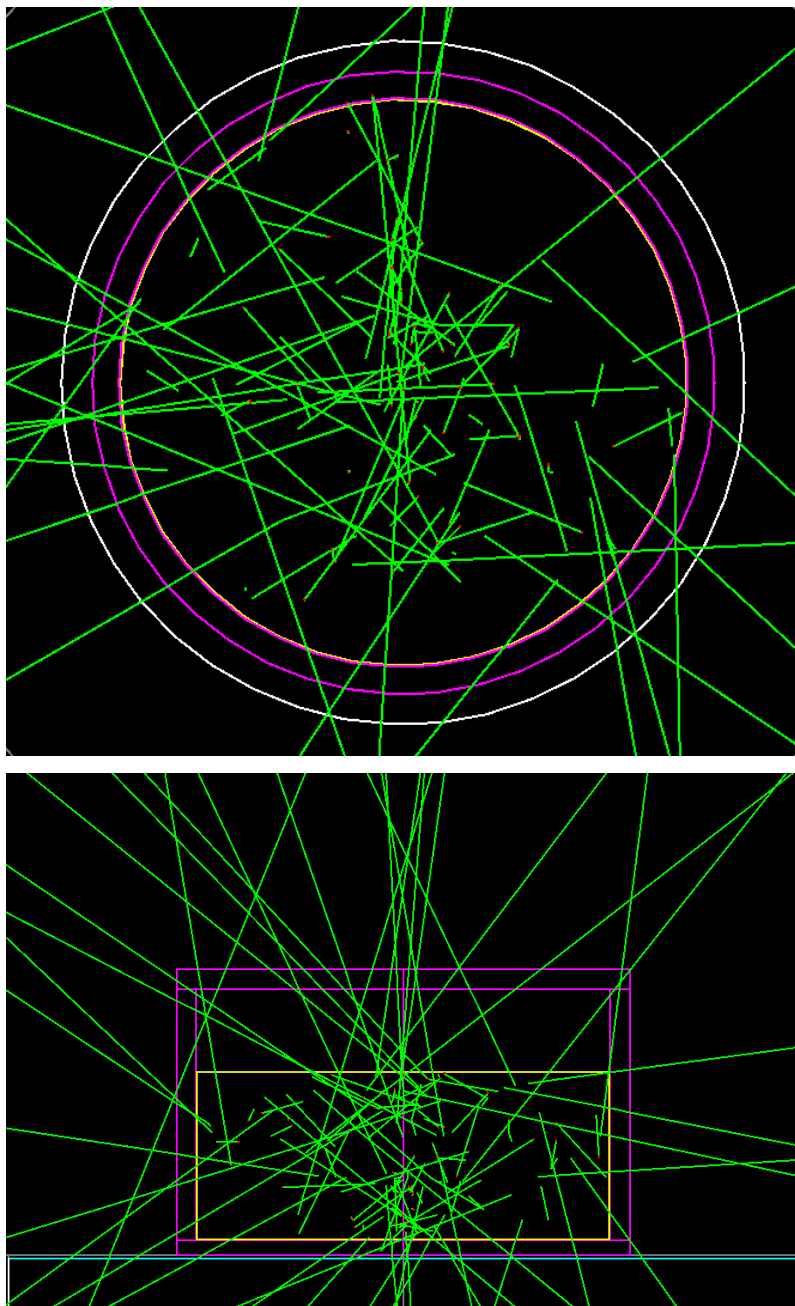
// juhuslik suunavektor
G4double cosTheta = 2*G4UniformRand() - 1.,
phi = twopi*G4UniformRand();
G4double sinTheta = sqrt(1. - cosTheta*cosTheta);
G4double ux = sinTheta*cos(phi),
uy = sinTheta*sin(phi),
uz = cosTheta;

// juhuslik asukoht
G4double nurk = twopi*G4UniformRand();
G4double raadius = detector->FilterR*G4UniformRand();

G4double
x = (raadius*cos(nurk))*mm,
y = (raadius*sin(nurk))*mm,
z = ((detector->FilterZ + detector->FilterH/2.)
- detector->FilterH*G4UniformRand())*mm;

```

Siinkohal `detector->FilterZ` ja `detector->FilterH` on *DetectorConstruction* klassis defineeritud aerosoolifiltri z-koordinaat ja kõrgus. Näitena on joonisel 9 saja footoni algpositsioonide ning liikumissuundade jaotumine proovis.



**Joonis 9. Gammafootonite lähtepunktide ning suundade jaotus pealt- ja kõrvaltvaates. Kollane joon ümbritseb uuritava proovi ala, rohelised jooned märgivad footonite trajektoore.**

## 7 DETEKTORI TUNDETU KIHI PAKSUSE MÄÄRAMINE

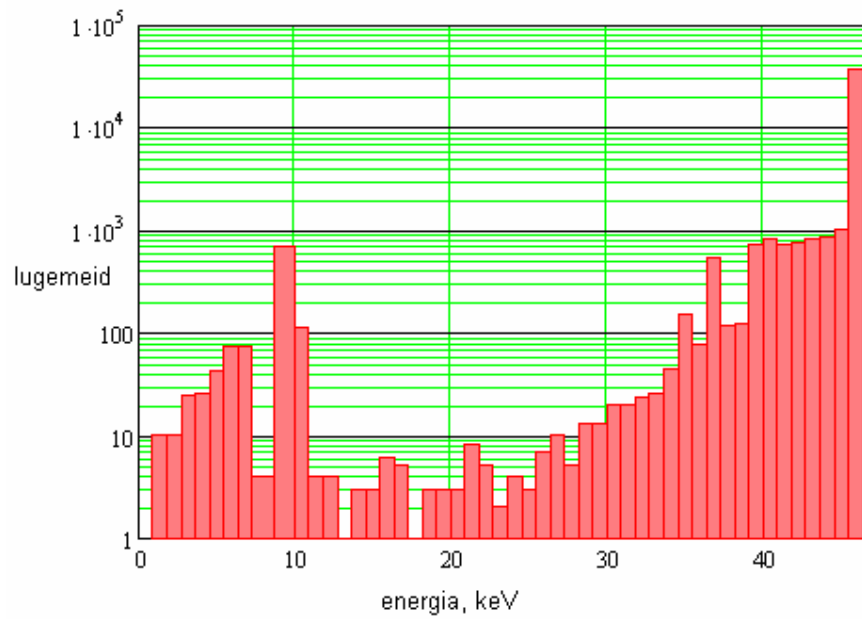
Kuna referentsallika aktiivsus on teada -  $4975 \pm 25$  Bq/kg, siis on selle jaoks võimalik mõõdetud loenduskiirusest valemi (1) abil leida efektiivsused. Kolmel proovi kõrgusel saadud tulemused on toodud tabelis 3.

**Tabel 3. RGU-1 referentsallika eksperimentaalselt määratud ja Geant4 arvutatud efektiivsused ( $\epsilon$ ).**

Proovi kõrgus, cm	$\epsilon$ , mõõdetud	$\pm$ SD,	$\epsilon$ , Geant4
2,6	0,0450	0,0010	0,046
1,21	0,0769	0,0020	0,071
0,64	0,0882	0,0026	0,089

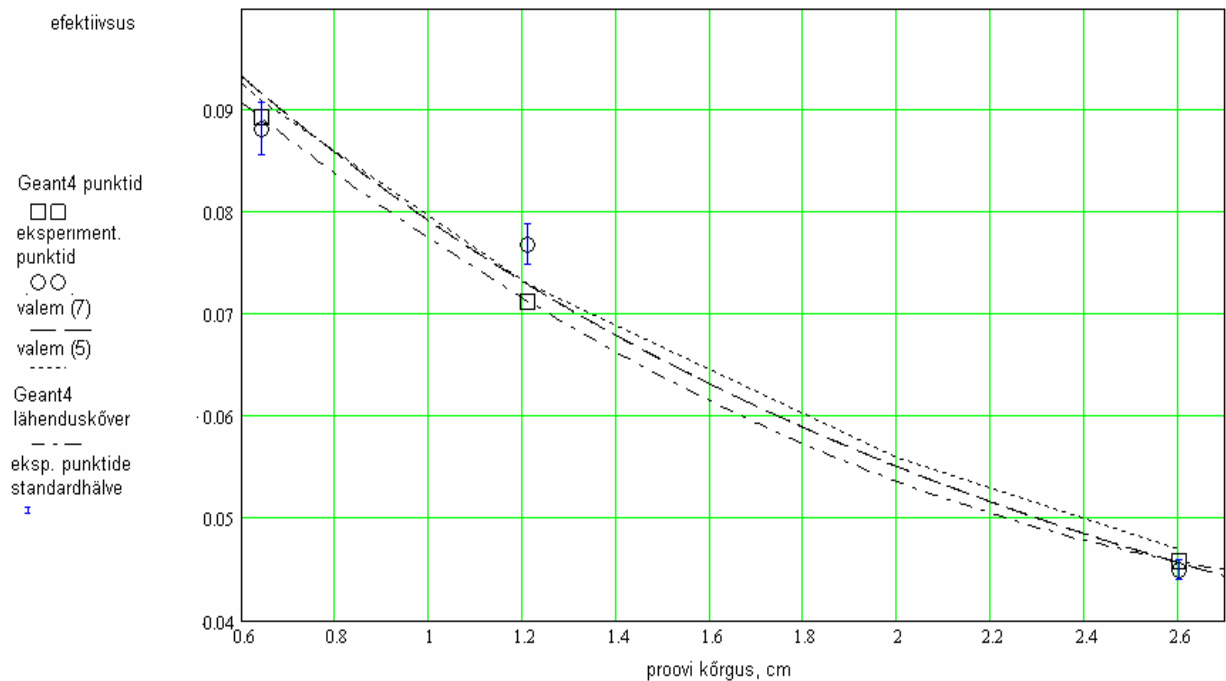
Kasutades eksperimentaalseid tulemusi õnnestus korrigeerida Geant4 simulatsioonis kasutatavat mõõtegeomeetriat. Eeldusel, et detektori reaalne geomeetria vastab tootja andmetele, võib oletada suhteliselt paksu tundetu kihti germaaniumkristalli ülapinnal. Optimaalseimaks osutus „surnud” kiht paksusega 185  $\mu\text{m}$ , kusjuures tundetu kihi 1 % muutuse juures muutus efektiivsuse väärtus 1,3 %. Niisugusel juhul vastavad Geant4 abil arvutatud efektiivsused (tabel 3) üsna hästi eksperimentaalsetele. Nagu eelpool mainitud, peaks planaardetektorite pinnal olema tegelikult oluliselt õhem kontakt. Võimalik on ka, et tundetu kiht ongi õhem, kuid ülejäänud detektori geomeetria, näiteks akna paksus või detektori kaugus aknast, ei ühti tootja andmetega. Siinkohal kasutan korrigeerimiseks siiski tundetu kihi paksust.

Geant4 simulatsiooni tulemustest on moodustatud energiaspektreid jäljendavad histogrammid. Joonisel 10 on toodud 1,21 cm paksuses RGU-1 proovis genereeritud 500 000 footoni (energiaga 46,5 keV) energiaspekter. Efektiivsus on leitud viimase ja eelviimase histogrammiposti vahest jagatuna kogu footonite arvuga (500 000).



**Joonis 10. RGU-1 proovist (paksus 1,21 cm) väljunud 46,5 keV fotonite Geant4 abil arvatud energiaspekter planaardetektoris GPD-50400. Genereeriti 500 000 footonit.**

Geant4 simulatsiooni abil arvatatud ja eksperimentaalselt leitud 46,5 keV joone efektiivsuste abil võib hinnata teoreetiliste arvutusvalemite (4) ja (5) ning (7) kehtivust. Kokkulangevusi iseloomustab joonis 11.



**Joonis 11. Erinevatel meetoditel leitud 46,5 keV fotojoone efektiivsused RGU-1 allika jaoks.**

Joonisel 11 on Geant4 abil arvutatud punktidele leitud lähendusvalem (punkt-kriipsjoon):

$$\varepsilon_{RGU-1} = 0,0675 \cdot t^2 - 0,04407 \cdot t + 0,11474 . \quad (16)$$

Punktiirjoon vastab ketasdetektori ja ruumallika mudelile vastavate valemite (4) ja (5) abil leitud efektiivsusele. Arvesse on võetud ka mõõtetopsi põhja ja Ge-kristalli tundetu kihi paksust.

Joonisel 11 on antud ka lähend ruumallikast ümbritsetud punktdetektori mudelile (kriipsjoon), millele on lisatud reaalsest geometriast tingitud parandustegurid (vt valem (7)):

$$\varepsilon = \frac{0,122 \cdot [1 - e^{-(0,525 + \mu)t}]}{(0,525 + \mu)t} . \quad (17)$$

Joonise 11 põhjal võib öelda, et sobivalt kohandatuna võib keeruliste arvutuste asemel leida efektiivsusi ka lihtsate mudelite abil. Kuna valemitele parandustegurite lisamine nõuab esialgu muul meetodil hinnatud efektiivsuse väärtusi, millest lähtuda, ning kujutab endast suurelt jaolt erinevate arvude proovimist, ei ole niisugused lihtsad mudelid mugavad erinevast materjalist proovide pidevaks analüüsiks. Täiuslikuma Geant4 modelleerimise eelis on kindlasti võimalus hinnata usaldusväärselt efektiivsusi proovide erinevate geometriate ja elementsisalduste jaoks, kui mingi „proov-detektor“- kombinatsioon on eksperimendiga sobitatud.

## 8 AEROSOLIFILTRITE EFEKTIIVSUSED JA $^{210}\text{Pb}$ AKTIIVSUSED

### Efektiivsused

Aerosoolifiltrites sisalduva  $^{210}\text{Pb}$  fotojoone efektiivsused on leitud programmide Gespecor ja Geant4 abil. Sealjuures on arvutused tehtud erinevate proovi kõrguste jaoks, millest kolm on iga filtri korral võrdsed referentsallika RGU-1 paksustega (2,6; 1,21 ja 0,64 cm). Gespecoriga on arvutused tehtud lisaks 2,0 cm juures ja Geant4 puhul 2-6 reaalselt mõõdetud geomeetria järgi. Erinevate kõrgustega filtriproovide tiheduse arvutamisel Geant4-s on kasutatud antud seirejaamast pärit filtritükkide keskmist (2,6; 1,21 ja 0,64 cm korral) või reaalselt massi. Kõikides Geant4 simulatsioonides on proovis genereeritud 500 000 võrdse energiaga (46,5 keV) footonit. Nii Gespecori kui Geant4 abil arvutatud efektiivsustele on leitud lähenduskõverad, mille abil on võimalik leida antud proovi aktiivsus.

Erinevatest paikadest pärit filtriproovide Gespecoriga ja Geant4-ga arvutatud efektiivsuste väärtused on toodud tabelis 4.

**Tabel 4. Gespecori ja Geant4 abil leitud efektiivsuste väärtused Harkust, Narva-Jõesuust ja Tõraverest pärit õhufiltritproovide erinevate kõrguste korral.**

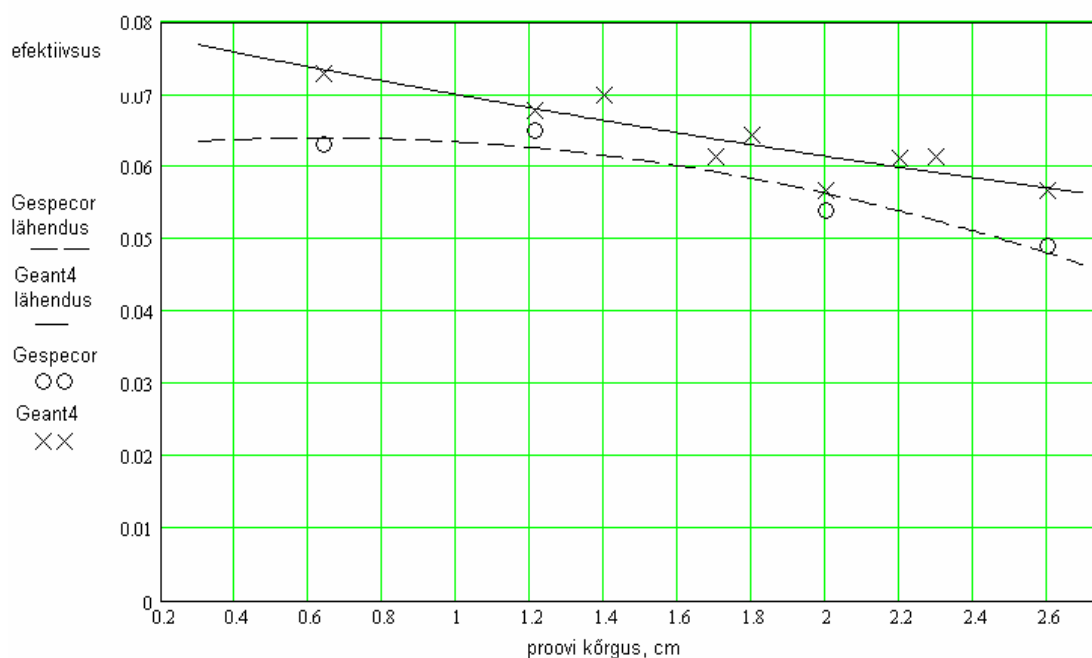
Proovi kõrgus, cm	Efektiivsus, Gespecor	Efektiivsus, Geant4	Tihedus Geant4 simulatsioonis, g/cm <sup>3</sup>
<b>Harku</b>			
2,6	0,049	0,057	0,49
2,3	-	0,061	0,45
2,2	-	0,061	0,51
2,0	0,054	0,057	0,81
1,8	-	0,064	0,64
1,7	-	0,061	0,84
1,4	-	0,070	0,76
1,21	0,064	0,068	1,06
0,64	0,063	0,073	2,00
<b>Narva-Jõesuu</b>			
2,6	0,040	0,040	0,42
2,3	-	0,042	0,48
2,0	0,043	-	-
1,7	-	0,046	0,61
1,21	0,051	0,047	0,90
1,0	-	0,045	1,17
0,64	0,049	0,049	1,71
<b>Tõravere</b>			
2,6	0,058	0,062	0,11
2,0	0,064	-	-
1,21	0,079	0,077	0,23
0,64	0,078	0,084	0,44
0,4	-	0,088	0,71
0,3	-	0,089	0,95

Iga filtri jaoks on arvatatud punktide järgi leitud efektiivsuse sõltuvust proovi kõrgusest iseloomustav lähenduskõver. Siinkohal  $t$  tähistab proovi kõrgust sentimeetrites ja efektiivsust märkiva  $\varepsilon$  alaindeks näitab, millise programmiga arvatatud punktidest on lähtutud. Lähenduskõverate valemeid iseloomustavad vastavad graafikud.

### Harku

$$\varepsilon_{HR\_Gespecor} = -0,00412 \cdot t^2 + 0,00522 \cdot t + 0,06232 \quad (18)$$

$$\varepsilon_{HR\_Geant4} = 0,00076 \cdot t^2 - 0,01080 \cdot t + 0,07999 \quad (19)$$



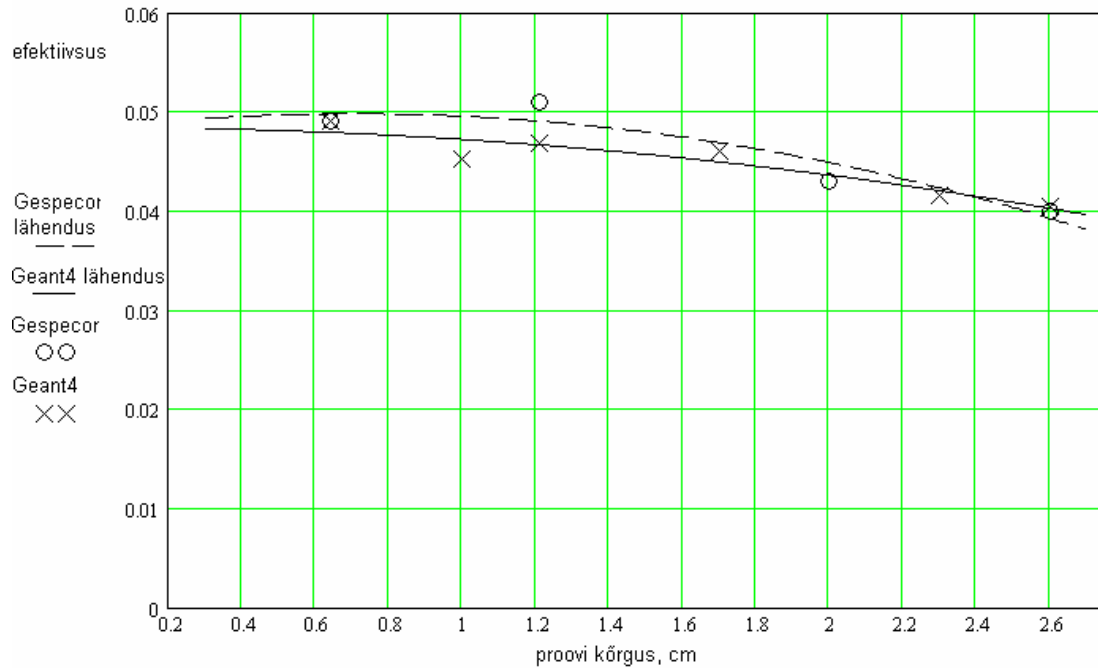
**Joonis 12. Efektiivsuse sõltuvus proovi kõrgusest, Harku. Erinevused võivad olla tingitud asjaolust, et Gespecori arvutustes on kasutatud suuremat neeldumiskoeffitsienti.**

Harku proovi korral pakub Geant4 välja süstemaatiliselt pisut suurema (ligikaudu 0,005 kuni 0,01 võrra) efektiivsuse, mis võib olla põhjustatud asjaolust, et Gespecori arvutustes on kasutatud eksperimentaalselt leitud neeldumiskoeffitsienti  $0,56 \pm 0,06 \text{ cm}^2/\text{g}$ , kuid Geant4 simulatsioonis defineeritud materjali ( $\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}$ ) neeldumiskoeffitsient on pisut väiksem -  $0,48 \text{ cm}^2/\text{g}$ . Muus osas on Geant4 abil leitud efektiivsuse käik proovi kõrgusest sõltuvalt igati loogiline ning puudub Gespecori arvutustele iseloomulik efektiivsuse langus väiksema kõrgusega proovide korral.

## Narva-Jõesuu

$$\varepsilon_{NJ\_Gespecor} = -0,00294 \cdot t^2 + 0,00414 \cdot t + 0,04835 \quad (20)$$

$$\varepsilon_{NJ\_Geant4} = -0,00085 \cdot t^2 - 0,00118 \cdot t + 0,04924 \quad (21)$$



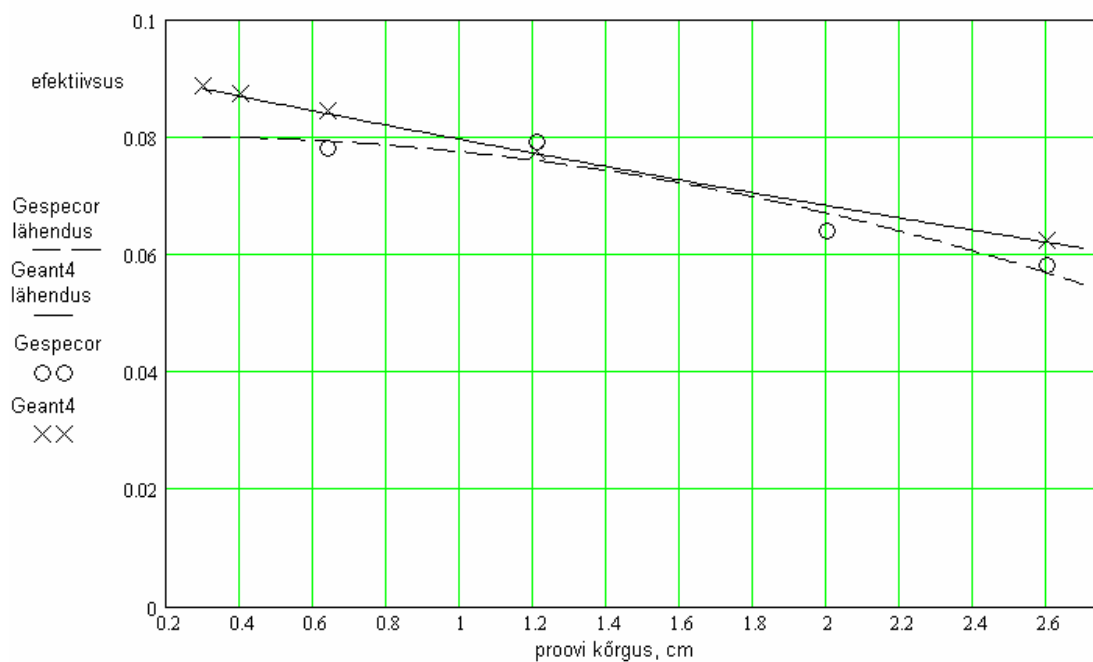
**Joonis 13. Efektiivsuse sõltuvus proovi kõrgusest, Narva-Jõesuu.**

Joonisel 13 on näha nii arvutatud efektiivsuste punktid kui ka nende lähendatud kõverad. Üldiselt on kokkulangevus hea, Geant4 puhul puudub vaid Gespecori arvutustest tekkinud efektiivsuse maksimum 1,21 cm kõrguse proovi korral.

## Tõravere

$$\varepsilon_{TR\_Gespecor} = -0,00403 \cdot t^2 + 0,00160 \cdot t + 0,07989 \quad (22)$$

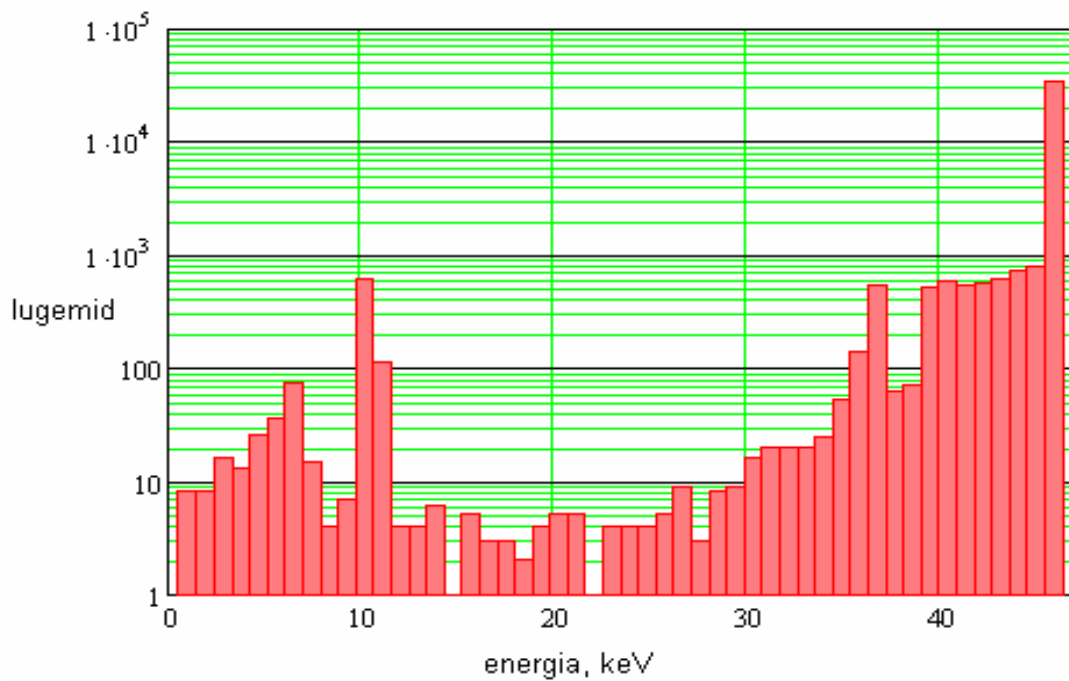
$$\varepsilon_{TR\_Geant4} = 0,00073 \cdot t^2 - 0,01363 \cdot t + 0,09283 \quad (23)$$



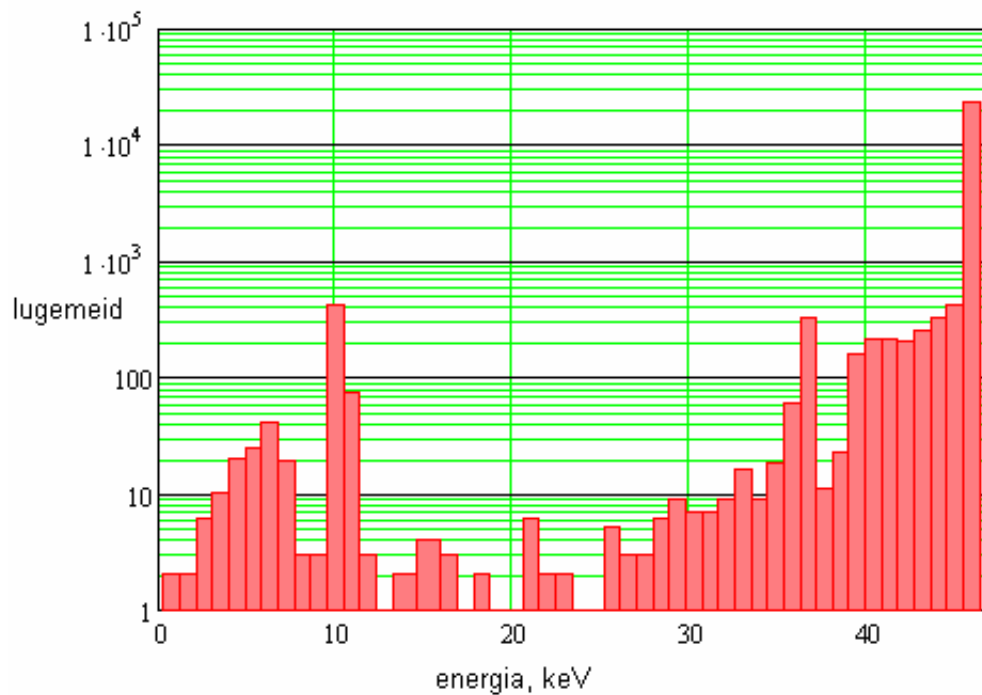
**Joonis 14. Efektiivsuse sõltuvus proovi kõrgusest, Tõravere.**

Joonisel 14 on kujutatud Gespecori abil arvatud efektiivsused ja nendele lähendatud kõver (vastavalt ringid ja kriipsjoon). Lisatud on Geant4-ga arvatud efektiivsus (rist) ja nende järgi leitud efektiivsuse käik (pidevjoon). Kuna Geant4 abil on simuleeritud ka 0,3 ja 0,4 cm kõrgusi filtriproove, võib arvata, et tegelikkusega on pigem kooskõlas Geant4 hinnatud efektiivsuse tõus proovi kõrguse kahanedes kui Gespecori hinnatud efektiivsuse käik.

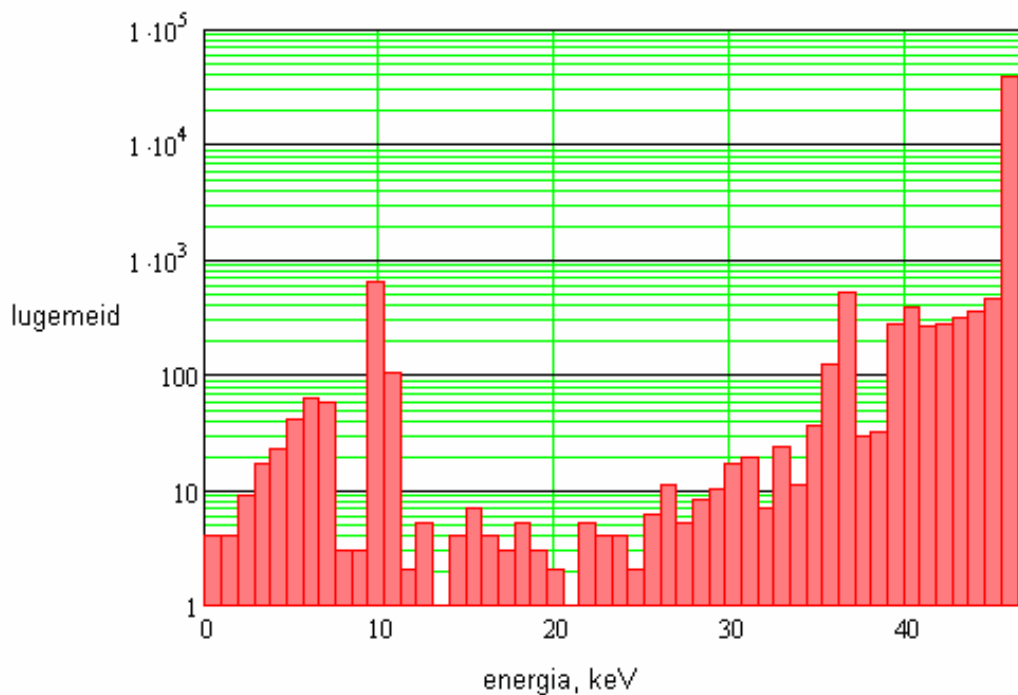
Joonistel 15, 16 ja 17 on näidatud vastavalt Harku, Narva-Jõesuu ja Tõravere õhufiltrite mudelist väljunud footonite energiaspektrid. Footoneid genereeriti 500 000, igauks energiaga 46,5 keV, proovide kõrgus oli 1,21 cm.



Joonis 15. Õhufiltri (paksus 1,21 cm, Harku jaam) mudelist kiiratud ja detektoris registreeritud footonite energiajaotus. Genereeriti 500 000 footonit.



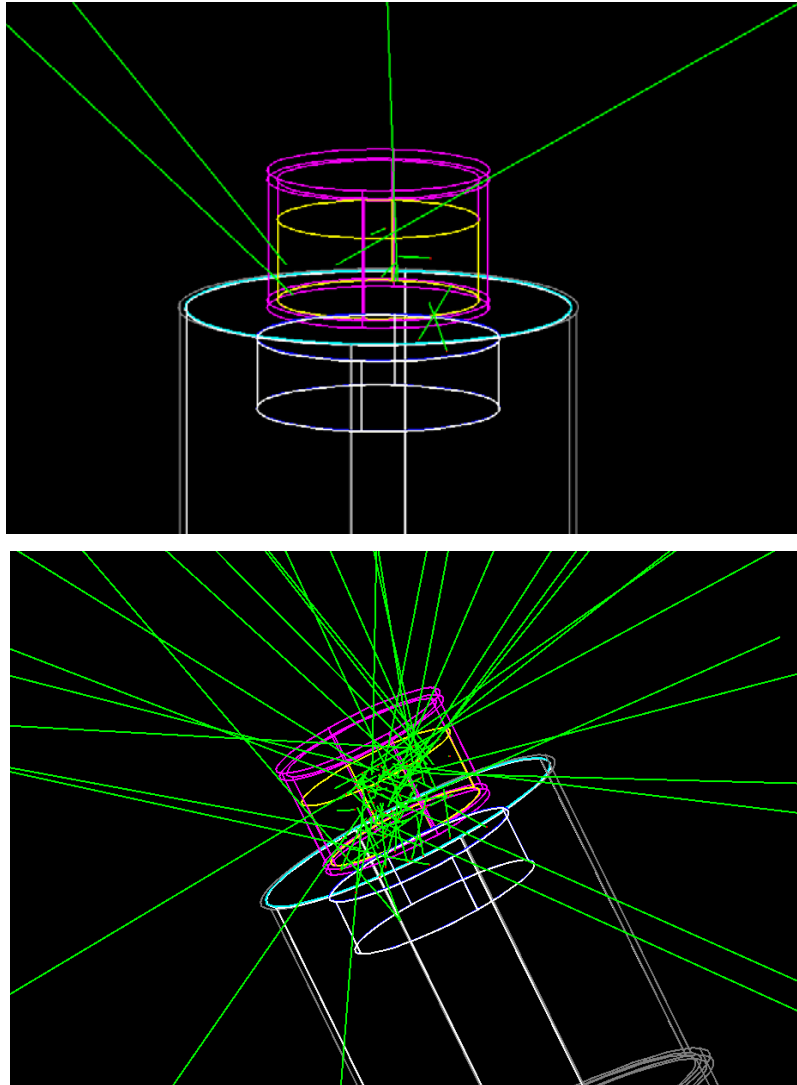
Joonis 16. Geant4 abil arvatatud energiaspekter 12,1 cm kõrguse Narva-Jõesuu õhufiltri proovi korral.



**Joonis 17. Energiaspekter Tõravere õhufiltri mudelist (1,21 cm paks) väljunud 46,5 keV footonitest, Geant4.**

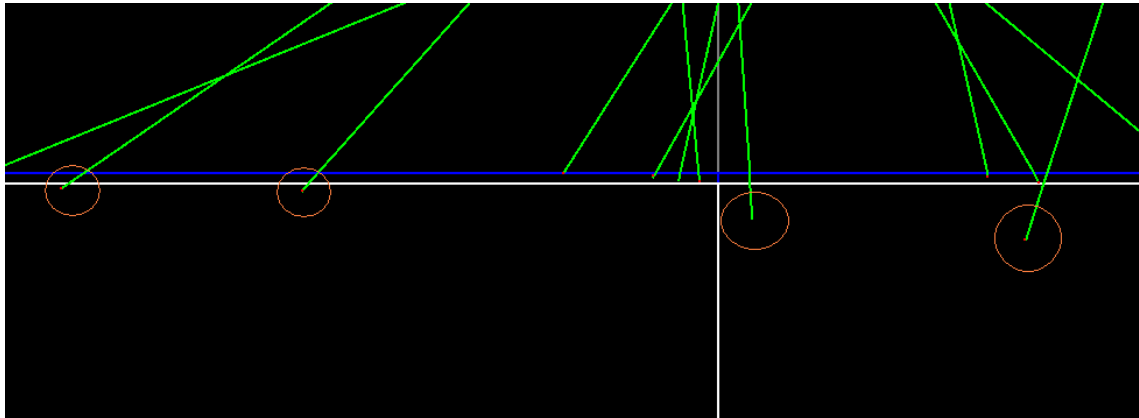
#### Footonite neeldumisest

Üldiselt võib öelda, et 46,5 keV energiaga footonid neelduvad väga suurel määral juba enne detektorini jõudmist. Vähestest germaaniumini jõudnud footonitest neeldub veel teatud osa kristalli tundetus kihis. Joonis 18 näitab ilmekalt, kui pikad on detektorist eemale (õhku) suunduvate footonite lennuteed ning kui lühikesed on teekonnad proovi sees ja detektori suunas. Arvestades filtrimaterjali suurt Pb-sisaldust ei ole see ka ime.



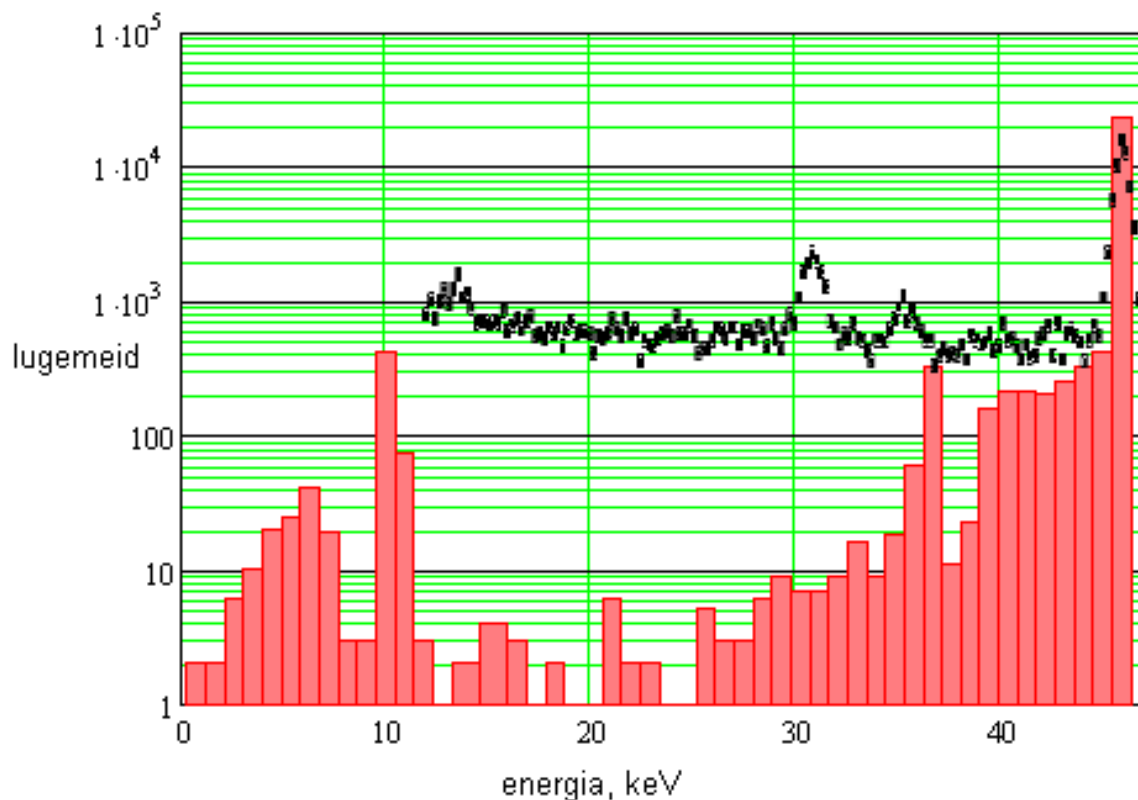
**Joonis 18. Narva-Jõesuu 1,7 cm paksusest proovist väljunud footonite teekonnad. Ülal 10 footonit, all 100. Proovi ümbritseb kollane joon. Rohelised jooned tähistavad footonite trajektore.**

Joonisel 19 on suurendatud detektori ülaosa kõrvaltvaates, sinine joon tähistab germaaniumkristalli ülakihti, valgest joonest allpool on tundlik ala, rohelisega on tähistatud footonite trajektorid. Oranžid ringid märgivad tundlikku alasse jõudnud footoneid. Punased täpid footonite trajektoride otstes tähistavad elektronide interaktsioone. Tegemist on sama simulatsiooniga, mille tulemus on näha joonise 18 alumisel osal – Narva-Jõesuu õhufiltri 1,7 cm paksuses proovis on genereeritud 100 footonit energiaga 46,5 keV. On näha, et detektori tundlikku alasse jõudis footoneid vaid neli.



**Joonis 19.** Sajast fotonist jõudis detektori tundlikku alasse neli (märgitud oranžide ringidega). Sinine joon on germaaniamkristalli ülapiind, valgest joonest allpool on detektori tundlik ala.

Kõrvutades Geant4 abil arvatud histogrammi reaalselt mõõdetud energiaspektriga (joonis 20), paistavad silma mitmedki erinevused.



**Joonis 20.** Geant4 abil arvatud ja reaalse spektri võrdlus Narva-Jõesuu filtri näitel. Histogramm näitab arvatud spektrit ja täppidest moodustub reaalselt mõõdetud spekter.

Teoreetilise spektri puhul on parempoolses servas näha 46,5 keV fotojoon. 9...11 keV juures näha oleva joone on tõenäoliselt põhjustanud ergastatud germaaniumi aatomite K

kihtidest pärinev röntgenkiirgus, sellega seoses tekib 37 keV lähedusse väljalöögiiki. Madalamatel energiatel kui 10 keV tekkinud kõrgem ala on moodustunud ilmselt tagasihajunud elektronide detekteerimisel. Eksperimentaalne spekter lõpeb 12 keV juures, kuna väiksemaid energiasid ei detekteerita, kuigi tabeli 1 andmetel võiks spekter ulatuda 3 keV-ni. 31 ja 35 keV juures asuvad mõõdetud spektris Cs röntgenjooned, mida arvatud spektris pole, kuna simulatsioon ei sisaldanud tseesiumi. Põhjus, miks reaalses spektris ei teki väljalöögiiki ja germaaniumi röntgenijoonet vahele madalamat ala, ei ole päris selge. Tõenäoliselt seletuseks on laengukorje ebatäpsused ning ka detektori osaline tundlikkus nn surnud alas, kuna neid aspekte füüsikalisi protsesse korrektselt simuleeriv Geant4 arvesse ei võta. (Venkataraman jt, 2005).

### Aktiivsused

Leitud efektiivsuse avaldiste abil on võimalik leida uuritavate filtriproovide aktiivsused. Valemist (1) järeldub, et parandatud efektiivsuse (st liikmed  $C_i$  võime välja jätta) kaudu avaldub aktiivsus:

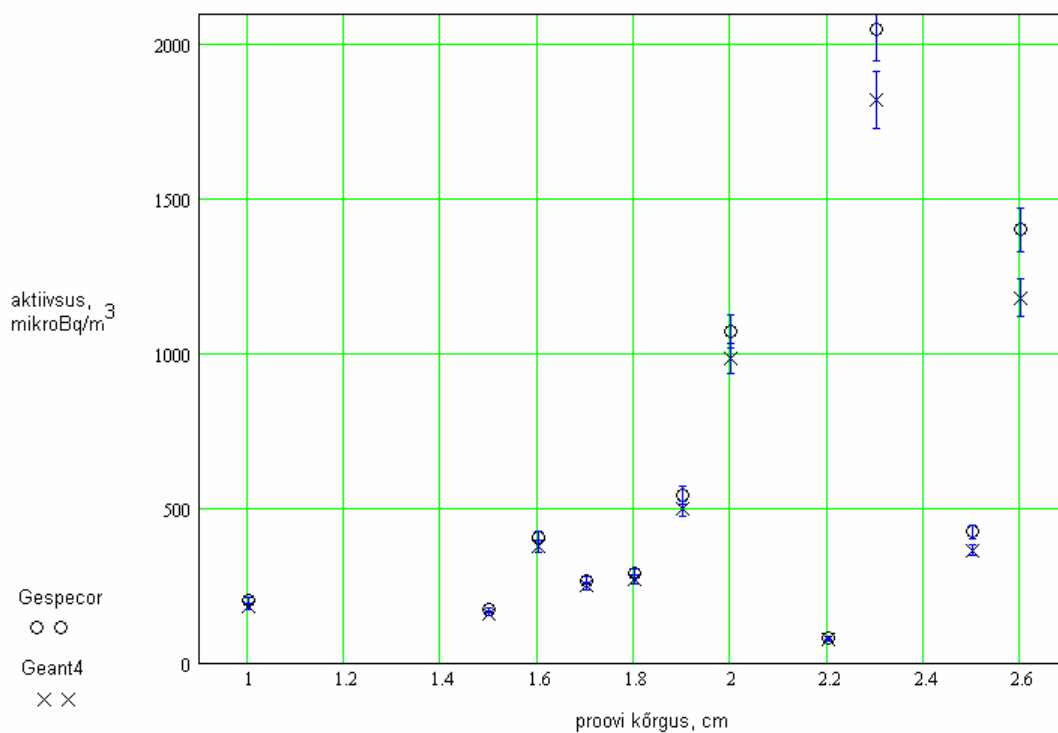
$$A = \frac{N}{\tau \cdot f \cdot \varepsilon}, \quad (24)$$

kus  $N/\tau$  on mõõtmisel saadud loenduskiirus,  $f$  on footoni emiteerumise tõenäosus (siin 4,25%) ja  $\varepsilon$  on lähendusvalemist arvatud efektiivsus. Radionukliidi sisalduse määramiseks õhus tuleb leitud aktiivsus jagada õhufiltrist läbi lastud õhu hulgaga saades tulemuseks aktiivsuse kuupmeetri kohta.

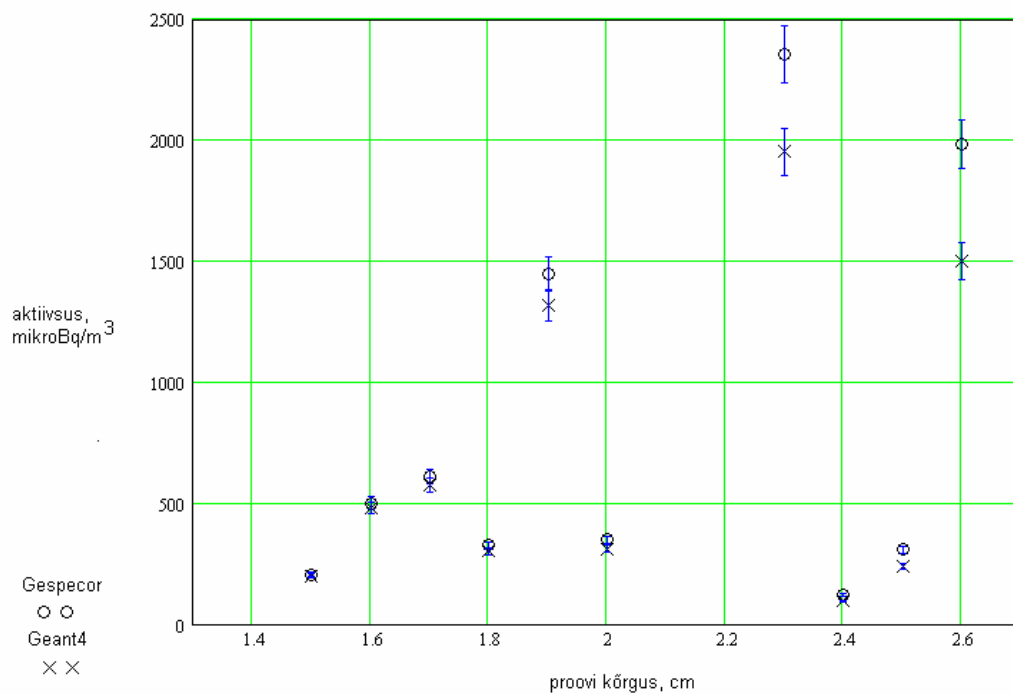
2005. aastal eksponeeritud õhufiltrite erinevate kõrgustega proovide aktiivsused on toodud tabelis 11 ja joonistel 21, 22, 23. Joonisel 24 on näitena toodud  $^{210}\text{Pb}$  kontsentratsioonid Harku seirejaama õhus mõõdetuna nädalaste intervallide tagant.

**Tabel 5. Õhufiltrite aktiivsuste näited. Kogumisaeg on igal filtril üks nädal.**

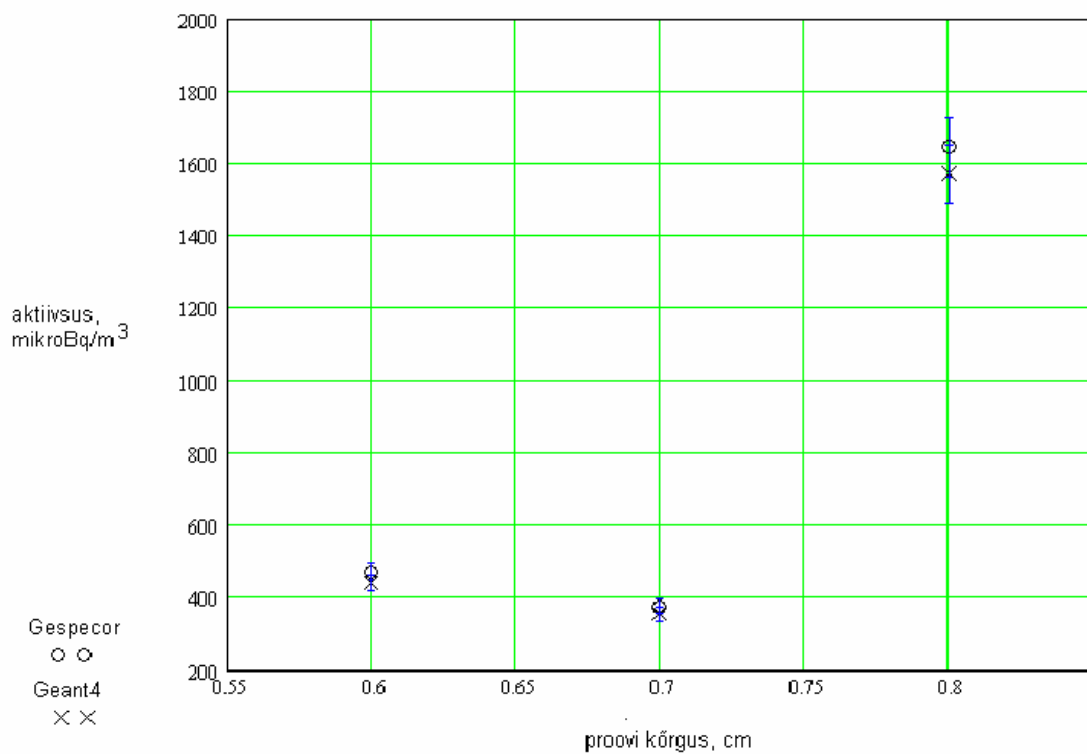
Kogumise lõpp	Aktiivsus, $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ , Gespecor	Aktiivsus, $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ , Geant4	Proovi kõrgus, cm
<b>Harku</b>			
2. jaanuar 2005	267	248	1,7
9. jaanuar 2005	81	73	2,2
23. jaanuar 2005	542	499	1,9
30. jaanuar 2005	1402	1181	2,6
6. veebruar 2005	1073	983	2,0
13. veebruar 2005	424	364	2,5
27. veebruar 2005	2050	1820	2,3
3. aprill 2005	291	270	1,8
17. aprill 2005	171	159	1,5
24. aprill 2005	405	377	1,6
27. juuli 2005	203	184	1,0
<b>Narva-Jõesuu</b>			
3. jaanuar 2005	325	301	1,8
10. jaanuar 2005	118	95	2,4
17. jaanuar 2005	206	200	1,5
7. veebruar 2005	1448	1319	1,9
21. veebruar 2005	2354	1952	2,3
28. veebruar 2005	1985	1500	2,6
21. märts 2005	611	576	1,7
28. märts 2005	307	240	2,5
4. aprill 2005	501	480	1,6
11. aprill 2005	348	311	2,0
<b>Tõravere</b>			
3. jaanuar 2005	377	356	0,7
7. veebruar 2005	1648	1572	0,8
7. märts 2005	471	441	0,6



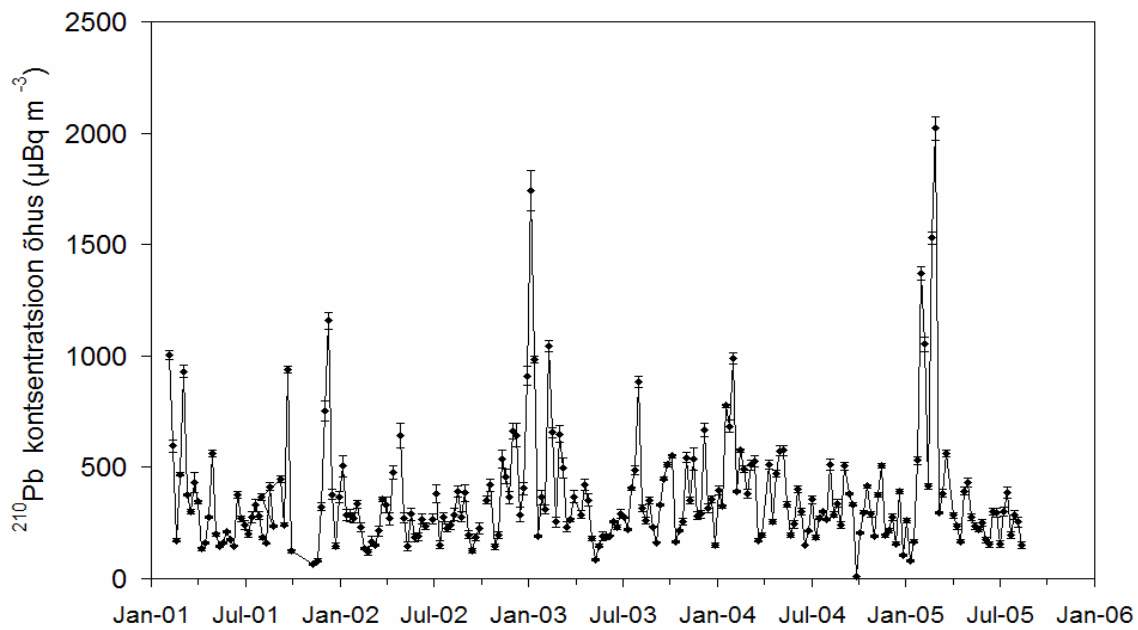
**Joonis 21. Harku õhu aktiivsus arvatatuna kahel meetodil, tulemustele on lisatud suhteline määramatus 5%.**



**Joonis 22. Narva-Jõesuu õhu aktiivsus arvatatuna kahel meetodil, tulemustele on lisatud suhteline määramatus 5%.**



Joonis 23. Tõravere õhu aktiivsus arvatatuna kahel meetodil, tulemustele on lisatud suhteline määramatus 5%.



Joonis 24. <sup>210</sup>Pb kontsentratsioonid õhus, Harku seirejaam, mõõdetud nädalaste intervallidega (Realo jt, 2006).

## 9 KOKKUVÕTE

Käesoleva töö raames kontrolliti IAEA referentsallika RGU-1 näitel kahe teoreetilise valemi – ketasdetektori-ruumallika ja ruumallikast ümbritsetud punktdetektori mudeli paikapidavust  $^{210}\text{Pb}$  46,5 keV fotojoone efektiivsuse hindamisel ning teekide kogumit Geant4 kasutavas simulatsioonis määratud geomeetria õigsust. Tulemusena võib öelda, et sobilike lisaliikmete kasutamisel kirjeldavad teoreetilised valemid proovi efektiivsuse kõrgusesõltuvust väga hästi. Geant4 simulatsiooni abil hinnati planaardetektori GPD-50400 germaaniumkristalli ülakihil tundetu kihi paksuseks 185  $\mu\text{m}$ . Vastavalt sellele korrigeeriti kasutatavat simulatsioonigeomeetriat.

Parandatud geomeetriat kasutades simuleeriti kolmest Eesti paigast (Harku, Narva-Jõesuu, Tõravere) pärit õhufiltrite proove eesmärgiga määrata  $^{210}\text{Pb}$  46,5 keV koguenergiajoone omaneeldumist arvestav efektiivsus. Kõrvaltulemusena selgus, et Tõravere ja Narva-Jõesuu seirejaamade klaaskiudfiltrid sisaldavad tõenäoliselt umbes 12 % pliioksiidi  $\text{PbO}$ . Efektiivsuse väärtusi võrreldi varem välja töötatud meetodil hinnatud efektiivsustega (kasutades programmi Gespecor). Geant4 simulatsioonist leitud efektiivsuse käik sõltuvalt proovi kõrgusest kattub osaliselt Gespecori abil määratuga, kuid erineb madala kõrgusega proovide korral.

Kasutades efektiivsuse sõltuvust proovi kõrgusest hinnati 2005 aasta I poolel eksponeeritud filtrite aktiivsusi tuues näitena välja erinevate proovi paksuste korral saadud tulemused. Gespecori ja Geant4 abil leitud väärtused langevad enamjaolt kokku, samas kui kõrgemate proovide korral hindab Gespecor aktiivsust Geant4 leitud mõnevõrra suuremaks. Arvestades, et Geant4 kasutab oma arvutustes realistlike füüsikaliste interaktsioonide simulatsioone, sealhulgas spetsiaalselt madala energiaga osakeste jaoks kirjutatud klasse, võib sel meetodil leitud aktiivsused usaldusväärsemaks lugeda.

Käesoleva töö autor tänab juhendajat, Enn Realot, kes on alati nõus jagama oma laialdasi ja põhjalikke teadmisi ning aitama, samuti teisi TÜ Füüsika Instituudi tuumaspektroskoopia labori töötajaid hea nõu ja toetuse eest. Tänu ka Andi Hektorile, kes autori Geant4 juurde juhatas. Eriline tänu Silver Lättile, kelle Linuxi alase õpetuse ja kannatlikkusega edenesuks töö oluliselt aeglasemas tempos.

## 10 SUMMARY

### **Efficiency calibration in gammaspectrometry using Monte Carlo methods**

In environmental radioactivity monitoring, routine gamma-ray spectrometry is applied to low level samples. Usually environmental samples are measured in standardized volume geometries and setups. If the calibration source and measured sample differ by their density and composition, they have different attenuation effects and corrections must be made. At low gamma energies, self-attenuation is extremely high and thus corrections become very important. In this paper, a method for finding self-attenuation corrected efficiency with the simulation toolkit Geant4, based on Monte Carlo methods is discussed and applied. The efficiency is calculated for  $^{210}\text{Pb}$  full-energy peak at 46,5 keV in the HPGe gamma spectrometry of high volume air filter samples from Harku, Narva-Jõesuu, Tõravere.

## 11 KASUTATUD KIRJANDUS

AIDA (Abstract Interfaces for Data Analysis) <http://aida.freehep.org/> 2005

Amako, K., Guatelli, S., Ivanchenko, V. N., Maire, M., Mascialino, B., Murakami, K., Nieminen, P., Pandola, L., Parlati, S., Pia, M. G., Piergentili, M., Sasaki, T., Urban, L. Comparison of Geant4 Electromagnetic Physics Models Against the NIST Reference Data *avaldamiseks: IEEE Transactions on Nuclear Science*, INFN/AE-05/04, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, 2005.

Apostolakis, J., Giani, S., Maire, M., Nieminen, P., Pia, M. G., Urban, L. Geant4 Low Energy Electromagnetic Models for Electrons and Photons *CERN-OPEN-99-034*, 1999.

Baltic Scientific Instruments *Gamma-ray Spectrometer Based on GPD-50400 Detection Unit, Passport and Operating Manual*, Riia, 2003.

CLHEP (A Class Library for High Energy Physics) <http://proj-clhep.web.cern.ch/proj-clhep/> 2005.

Debertin, K. ja Helmer, R. G. *Gamma- and X-ray spectrometry with semiconductor detectors*, Amsterdam, Elsevier, 1988.

Dowdall, M. Practicable Monte Carlo Calibration of HPGe Detectors for Environmental Measurements *Proceedings of the Summary Seminar within the NKS-B Programme 2002-2005*, Ilus, E. (toim.), Soome, STUK, 2006, 116-126.

freshmeat.net *Project details for Geant4* <http://freshmeat.net/projects/geant4/> 2006.

Geant4 Collaboration, Geant4 – a simulation toolkit *Nucl. Instr. Meth.*, 2003, **A506**, 250-303.

Geant4 User's Documents *Geant4 User's Guide for Application Developers* <http://geant4.web.cern.ch/geant4/G4UsersDocuments/UsersGuides/ForApplicationDeveloper/html71/index.html> 2005a.

Geant4 User's Documents *Physics Reference Manual*

<http://geant4.web.cern.ch/geant4/G4UsersDocuments/UsersGuides/PhysicsReferenceManual/html71/PhysicsReferenceManual.html> 2005b.

Geant4 võrguleht <http://geant4.web.cern.ch/geant4/> 2006.

Geant4.7.1 Release Notes

<http://geant4.web.cern.ch/geant4/support/ReleaseNotes4.7.1.html> 2005.

Hektor, A., Anton, L., Skaburskas, K., Teder, H. First scientific results from the Estonian Grid *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, Physics, Mathematics*, 2005, **54** (2), 111-127.

Hurtado, S., Garcia-Leon, M., Garcia-Tenorio, R. Geant4 code for simulation of germanium gamma-ray detector and its application to efficiency calibration *Nucl. Instr. Meth.*, 2004, **A518**, 764-774.

IAEA Analytical Quality Control Services *Preparation and certification of IAEA gamma spectrometry reference materials RGU-1, RGTh-1 and RGK-1*, Austria, IAEA.

Isakar, K. Monte Carlo meetod omaneeldumise parandustegurite hindamisel  $^{210}\text{Pb}$  Gammaspektromeetrias, *bakalaureusetöö*, Tartu, 2004.

Kiirguskeskus *Keskkonna ioniseeriva kiirguse seire 2003 aasta tulemused*

[http://www.envir.ee/kiirgus/image/kiirgusseire\\_aastaaruanne\\_2003.pdf](http://www.envir.ee/kiirgus/image/kiirgusseire_aastaaruanne_2003.pdf) 2004.

Knoll, G. F *Radiation detection and measurement* USA, John Wiley & Sons, 1989.

Kollo, T. *Monte Carlo meetodid* Tartu, Tartu Ülikooli Kirjastus, 2004, 62-64, 78-83 ja 213.

Lust, M., Realo, E. Radioecology in Estonia – developments *Proceedings of the Summary Seminar within the NKS-B Programme 2002-2005*, Ilus, E. (toim.), Soome, STUK, 2006, 127-133.

MATec GmbH *Gespecor user guide, version 2.0*, 1999.

NIST (National Institute of Standards and Technology) *XCOM: Photon Cross Sections Database* <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/Text/XCOM.html> 2005.

OSI (Open Source Initiative) *The BSD License* <http://opensource.org/licenses/bsd-license.html> 2006.

Pilleyre, T., Sanzelle, S., Miallier, D., Fain, J., Courtine, F. Theoretical and experimental estimation of self-attenuation corrections in determination of  $^{210}\text{Pb}$  by  $\gamma$ -spectrometry with well Ge detector *Radiation Measurements*, 2006, **41**, 323-329.

Realo, K., Isakar, K., Lust, M., Realo, E. Weekly variation of  $^{210}\text{Pb}$  air concentrations in North Estonia, Ikäheimonen, T. K. (toim.), *Ympäristön radioaktiivisuus Suomessa – 20 vuotta Tshernobylista, STUK-A217*, STUK, Helsinki, 2006, 195-198.

Red Cullen's Homepage <http://www.llnl.gov/cullen1/#nadata> 2005.

Sima, O., Dovlete, C. Matrix effects in the activity measurement of environmental samples – implementation of specific corrections in a gamma-ray spectrometry analysis program *Appl. Radiat. Isot.*, 1997, **48**, 1, 59-69.

Venkataraman, R., Croft, S., Russ, W. R. Calculation of peak-to-total ratios for high purity germanium detectors using Monte Carlo modeling *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2005, **264**, 1, 183-191.

Wikipedia, the Free Encyclopedia *Monte Carlo method* [http://en.wikipedia.org/wiki/Monte\\_Carlo\\_method](http://en.wikipedia.org/wiki/Monte_Carlo_method) 2006.

WIRED3 User's Home Page <http://www.slac.stanford.edu/BFROOT/www/Computing/Graphics/Wired/#intro> 2005.

# LISA 1

## Väljund

Väljundfail, 17 mm kõrgusega Narva-Jõesuu päritolu õhufiltri simulatsioonist. 46,5 keV energiaga gammafootoneid genereeriti 100, neist detektori tundliku alani jõudis vaid 4.

```
*****
Geant4 version Name: geant4-07-01-patch-01      (25-October-2005)
                    Copyright : Geant4 Collaboration
                    Reference  : NIM A 506 (2003), 250-303
                    WWW       : http://cern.ch/geant4
*****

Visualization Manager instantiating...
Visualization Manager initialising...
Registering graphics systems...

You have successfully chosen to use the following graphics systems.
Current available graphics systems are:
  ASCIIITree (ATree)
  DAWNFILE (DAWNFILE)
  GAGTree (GAGTree)
  G4HepRepFile (HepRepFile)
  G4HepRep (HepRepXML)
  RayTracer (RayTracer)
  VRML1FILE (VRML1FILE)
  VRML2FILE (VRML2FILE)
  VRML1 (VRML1)
  VRML2 (VRML2)
Material:      Air      density: 1.290 mg/cm3  temperature: 273.15 K
pressure:     1.00 atm  RadLength: 287.606 m
  ---> Element: Nitrogen (N)  Z = 7.0   N = 14.0   A = 14.01 g/mole
fractionMass: 78.00 % Abundance 80.19 %
  ---> Element: Oxygen (O)   Z = 8.0   N = 16.0   A = 16.00 g/mole
fractionMass: 22.00 % Abundance 19.81 %
Material:      Vaakum    density: 0.000 mg/cm3  temperature: 273.15 K
pressure:     1.00 atm  RadLength: 18392.916 km
  ---> Element: Nitrogen (N)  Z = 7.0   N = 14.0   A = 14.01 g/mole
fractionMass: 70.00 % Abundance 72.71 %
  ---> Element: Oxygen (O)   Z = 8.0   N = 16.0   A = 16.00 g/mole
fractionMass: 30.00 % Abundance 27.29 %
Material:      Germanium density: 5.323 g/cm3   temperature: 273.15 K
pressure:     1.00 atm  RadLength: 2.302 cm
  ---> Element: Germanium ( ) Z = 32.0   N = 72.6   A = 72.64
g/mole fractionMass: 100.00 % Abundance 100.00 %
Material:      BerCium density: 1.850 g/cm3   temperature: 273.15 K
pressure:     1.00 atm  RadLength: 35.237 cm
  ---> Element: BerCium ( )  Z = 4.0   N = 9.0    A = 9.01
g/mole fractionMass: 100.00 % Abundance 100.00 %
Material:      Alumiinium density: 2.700 g/cm3   temperature: 273.15 K
pressure:     1.00 atm  RadLength: 8.893 cm
  ---> Element: Alumiinium ( ) Z = 13.0  N = 27.0   A = 26.98
g/mole fractionMass: 100.00 % Abundance 100.00 %
Material:      Polystyren density: 1.060 g/cm3   temperature: 273.15 K
pressure:     1.00 atm  RadLength: 41.312 cm
```

```

    ---> Element: Hydrogen (H)   Z = 1.0   N = 1.0   A = 1.01 g/mole
fractionMass: 7.74 % Abundance 50.00 %
    ---> Element: Carbon (C)    Z = 6.0   N = 12.0  A = 12.01 g/mole
fractionMass: 92.26 % Abundance 50.00 %
Material: Pb glass   density: 613.289 mg/cm3  temperature: 273.15 K
pressure: 1.00 atm  RadLength: 32.517 cm
    ---> Element: Silicon (Si)  Z = 14.0  N = 28.1  A = 28.09 g/mole
fractionMass: 38.33 % Abundance 30.37 %
    ---> Element: Oxygen (O)   Z = 8.0   N = 16.0  A = 16.00 g/mole
fractionMass: 46.51 % Abundance 64.69 %
    ---> Element: Lead (Pb)    Z = 82.0  N = 207.2  A = 207.20 g/mole
fractionMass: 11.14 % Abundance 1.20 %
    ---> Element: Sodium (Na)  Z = 11.0  N = 23.0  A = 22.99 g/mole
fractionMass: 2.97 % Abundance 2.87 %
    ---> Element: Aluminium (Al) Z = 13.0  N = 27.0  A = 26.98
g/mole fractionMass: 1.06 % Abundance 0.87 %
proovi kõrgus on: 17 mm
proovi põhja pindala on: 1371.58 mm2
proovi tihedus on: 0.613289 g/cm3
Filtri raadius: 20.9 mm
Filtri paksus: 17 mm
Filtri koorinaadid: (0,0,-13.9)
PhysicsList::SetCuts:CutLength : 0.001 (mm)
/run/verbose 1
#
# Create empty scene ("world" is default)
/vis/scene/create
#
# Create a scene handler for a specific graphics system
# Edit the next line(s) to choose another graphic system
#
#/vis/open DAWNFILE
#
#/vis/open OGLIX
/vis/open HepRepFile
/vis/sceneHandler/create HepRepFile
/vis/sceneHandler/attach
/vis/viewer/create !! 600
#
# Draw scene
/vis/viewer/zoom 2
/vis/viewer/flush
/vis/viewer/refresh viewer-0
G4Scene::AddWorldIfEmpty: The scene was empty,
"world" has been added.
HepRepFile writing to G4Data0.heprep
/vis/viewer/update viewer-0
#
# for drawing the tracks
# if too many tracks cause core dump => storeTrajectory 0
/tracking/storeTrajectory 1
/vis/scene/endOfEventAction accumulate
#
/pliiNJ1/event/drawTracks
/run/beamOn 100

msc: Model variant of multiple scattering for e-
      Lambda tables from 100 eV to 100 TeV in 120 bins.
      Boundary algorithm is active with facrange= 0.199

```

G4AugerData for Element no. 6 are loaded  
 G4AugerData for Element no. 7 are loaded  
 G4AugerData for Element no. 8 are loaded  
 G4AugerData for Element no. 11 are loaded  
 G4AugerData for Element no. 13 are loaded  
 G4AugerData for Element no. 14 are loaded  
 G4AugerData for Element no. 32 are loaded  
 G4AugerData for Element no. 82 are loaded  
 AugerTransitionTable complete

LowEnergyIoni: Total cross sections from EEDL database.  
 Gamma energy sampled from a parametrised formula.  
 Implementation of the continuous dE/dx part.  
 At present it can be used for electrons in the energy range  
 [250eV,100GeV].  
 The process must work with G4LowEnergyBremsstrahlung.

LowEnBrem: Total cross sections from EEDL database.  
 Gamma energy sampled from a parameterised formula.  
 Implementation of the continuous dE/dx part.  
 At present it can be used for electrons in the energy range  
 [250eV,100GeV].  
 The process must work with G4LowEnergyIonisation.

===== Table of registered couples =====

Index : 0      used in the geometry : Yes      recalculation needed : No  
 Material : Air  
 Range cuts      : gamma 1 mum      e- 1 mum      e+ 0 fm  
 Energy thresholds : gamma 990 eV      e- 990 eV      e+ 990 eV  
 Region(s) which use this couple :  
 DefaultRegionForTheWorld

Index : 1      used in the geometry : Yes      recalculation needed : No  
 Material : Vaakum  
 Range cuts      : gamma 1 mum      e- 1 mum      e+ 0 fm  
 Energy thresholds : gamma 990 eV      e- 990 eV      e+ 990 eV  
 Region(s) which use this couple :  
 DefaultRegionForTheWorld

Index : 2      used in the geometry : Yes      recalculation needed : No  
 Material : Germanium  
 Range cuts      : gamma 1 mum      e- 1 mum      e+ 0 fm  
 Energy thresholds : gamma 990 eV      e- 1.91672 keV      e+ 990 eV  
 Region(s) which use this couple :  
 DefaultRegionForTheWorld

Index : 3      used in the geometry : Yes      recalculation needed : No  
 Material : BerC<sup>111</sup>llium  
 Range cuts      : gamma 1 mum      e- 1 mum      e+ 0 fm  
 Energy thresholds : gamma 990 eV      e- 990 eV      e+ 990 eV  
 Region(s) which use this couple :  
 DefaultRegionForTheWorld

Index : 4      used in the geometry : Yes      recalculation needed : No  
 Material : Alumiinium  
 Range cuts      : gamma 1 mum      e- 1 mum      e+ 0 fm  
 Energy thresholds : gamma 990 eV      e- 990 eV      e+ 990 eV  
 Region(s) which use this couple :

DefaultRegionForTheWorld

Index : 5      used in the geometry : Yes      recalculation needed : No  
Material : Polysturen  
Range cuts        : gamma 1 mum      e- 1 mum      e+ 0 fm  
Energy thresholds : gamma 990 eV      e- 990 eV      e+ 990 eV  
Region(s) which use this couple :  
    DefaultRegionForTheWorld

Index : 6      used in the geometry : Yes      recalculation needed : No  
Material : Pb glass  
Range cuts        : gamma 1 mum      e- 1 mum      e+ 0 fm  
Energy thresholds : gamma 990 eV      e- 990 eV      e+ 990 eV  
Region(s) which use this couple :  
    DefaultRegionForTheWorld

=====  
### Run 0 start.

----- Ranecu engine status -----  
Initial seed (index) = 0  
Current couple of seeds = 9876, 54321  
-----

/vis/scene/notifyHandlers  
HepRepFile writing to G4Data1.heprep  
Start Run processing.  
46.5  
46.5  
46.5  
46.5  
Run terminated.  
Run Summary  
  Number of events processed : 100  
  User=0.21s Real=0.25s Sys=0.04s  
/vis/viewer/update

----- Ranecu engine status -----  
Initial seed (index) = 0  
Current couple of seeds = 897136419, 1265911924  
-----

Graphics systems deleted.  
Visualization Manager deleting...  
G4 kernel has come to Quit state.

## Mõõtegeomeetria konstrueerimine ja kasutatavad füüsikalised protsessid

Näitena töö programmeerimise küljelt on järgnevalt toodud failide *DetectorConstruction.cc*, milles defineeritakse mõõtegeomeetria, ja *PhysicsList.cc*, milles defineeritakse kasutatavad osakesed ja füüsikalised protsessid, sisu:

### DetectorConstruction.cc

```
#include "DetectorConstruction.hh"
#include "DetectorSD.hh"

#include "G4Material.hh"
#include "G4Tubs.hh"
#include "G4Box.hh"
#include "G4LogicalVolume.hh"
#include "G4VPhysicalVolume.hh"
#include "G4PVPlacement.hh"
#include "G4SDManager.hh"

#include "G4PhysicalVolumeStore.hh"
#include "G4LogicalVolumeStore.hh"
#include "G4SolidStore.hh"

#include "G4VisAttributes.hh"
#include "G4Colour.hh"

#include "G4RunManager.hh"

#include "G4ios.hh"

DetectorConstruction::DetectorConstruction() :
HallMat(NULL), DetectorMat(NULL), AkenMat(NULL), TyhiMat(NULL),
YmbrisMat(NULL), TopsMat(NULL), FilterMat(NULL),
Hall(NULL), logicalHall(NULL), physicalHall(NULL),
CrysDetector(NULL), logicalCrysDetector(NULL), physicalCrysDetector(NULL),
Aken(NULL), logicalAken(NULL), physicalAken(NULL),
Tyhi(NULL), logicalTyhi(NULL), physicalTyhi(NULL),
Ymbris1(NULL), logicalYmbris1(NULL), physicalYmbris1(NULL),
Ymbris2(NULL), logicalYmbris2(NULL), physicalYmbris2(NULL),
Ymbris3(NULL), logicalYmbris3(NULL), physicalYmbris3(NULL),
Tops1(NULL), logicalTops1(NULL), physicalTops1(NULL),
Tops2(NULL), logicalTops2(NULL), physicalTops2(NULL),
Tops3(NULL), logicalTops3(NULL), physicalTops3(NULL),
Filter(NULL), logicalFilter(NULL), physicalFilter(NULL),
Det1(NULL), logicalDet1(NULL), physicalDet1(NULL),
detectorSD(NULL)
{
    FilterH = 17.*mm;
    FilterZ = -22.4*mm + FilterH/2;
    FilterPos = G4ThreeVector(0.0*mm, 0.0*mm, FilterZ);
    FilterMass = 14.3*g;
    FilterR = 20.9*mm;
    FilterDensity = FilterMass/(FilterH*FilterR*FilterR*3.14);
}

DetectorConstruction::~DetectorConstruction()
```

```

{
}

G4VPhysicalVolume* DetectorConstruction::Construct()
{
    DefineMaterials();
    return ConstructDetector();
}

void DetectorConstruction::DefineMaterials()
{
    // Materials
    G4String name, symbol;
    G4double a, z, density, ohkDensity;
    G4int ncomponents;
    G4int natoms;

    // air
    G4Element* elN = new G4Element("Nitrogen", "N", z=7., a=14.01*g/mole);
    G4Element* elO = new G4Element("Oxygen", "O", z=8., a=16.00*g/mole);

    ohkDensity=1.29*mg/cm3;
    G4Material* Air = new G4Material("Air", ohkDensity, ncomponents=2);
    Air->AddElement(elN, 78*perCent);
    Air->AddElement(elO, 22*perCent);

    // vacuum, inside cryostat, around crystal
    density=0.00002*mg/cm3;
    G4Material* Vaakum = new G4Material("Vaakum", density, ncomponents=2);
    Vaakum->AddElement(elN, 70*perCent);
    Vaakum->AddElement(elO, 30*perCent);

    // Ge - detector
    G4Material* Ge= new G4Material("Germanium", z=32., a=72.64*g/mole,
density=5323*mg/cm3);
    Ge->GetIonisation()->SetMeanExcitationEnergy(2.96*eV);

    // Be - window material
    G4Material* Be=new G4Material("Berüllium", z=4., a=9.012*g/mole,
density=1.85*g/cm3);

    // Al - cryostat material
    G4Material* Al = new G4Material("Alumiinium", z=13., a=26.98*g/mole,
density=2.7*g/cm3);

    // polyst. - beaker material
    G4Element* elH = new G4Element("Hydrogen", "H", z=1.,
a=1.00794*g/mole);
    G4Element* elC = new G4Element("Carbon", "C", z=6., a=12.0107*g/mole);

    G4Material* Poly = new G4Material("Polysturen", density=1.06*g/cm3,
ncomponents=2);
    Poly->AddElement(elH, 7.7421*perCent);
    Poly->AddElement(elC, 92.2579*perCent);

    // air filter material
    G4Element* elSi = new G4Element("Silicon", "Si", z=14.,
a=28.0855*g/mole);

```

```

G4Element* elPb = new G4Element("Lead", "Pb", z=82., a=207.2*g/mole);
G4Element* elNa = new G4Element("Sodium", "Na", z=11.,
a=22.9898*g/mole);
G4Element* elAl = new G4Element("Aluminium", "Al", z=13.,
a=26.98*g/mole);

G4double paksus = FilterH, raadius = FilterR, pindala =
raadius*raadius*3.14;
G4double mass = FilterMass;
FilterDensity = mass/(paksus*pindala);

G4Material* SiO2 = new G4Material("SiO2", density=2.533*g/cm3,
ncomponents=2);
SiO2->AddElement(elSi, natoms=1);
SiO2->AddElement(elO, natoms=2);

G4Material* PbO = new G4Material("PbO", density=9.350*g/cm3,
ncomponents=2);
PbO->AddElement(elPb, natoms=1);
PbO->AddElement(elO, natoms=1);

G4Material* Na2O = new G4Material("Na2O", density=2.270*g/cm3,
ncomponents=2);
Na2O->AddElement(elNa, natoms=2);
Na2O->AddElement(elO, natoms=1);

G4Material* Al2O3 = new G4Material("Al2O3", density=4.000*g/cm3,
ncomponents=2);
Al2O3->AddElement(elAl, natoms=2);
Al2O3->AddElement(elO, natoms=3);

G4Material* PbGlass = new G4Material("Pb glass", FilterDensity,
ncomponents=4);
PbGlass->AddMaterial(SiO2, 82.*perCent);
PbGlass->AddMaterial(PbO, 12.*perCent);
PbGlass->AddMaterial(Na2O, 4.*perCent);
PbGlass->AddMaterial(Al2O3, 2.*perCent);

//Print out the materials
G4cout << Air << G4endl << Vaakum << G4endl << Ge << G4endl << Be <<
G4endl << Al << G4endl << Poly << G4endl << PbGlass << G4endl;

G4cout << "proovi kõrgus on: " << paksus/mm << " mm" << G4endl <<
"proovi põhja pindala on: " << pindala/mm2 << " mm2" << G4endl <<
"proovi tihedus on: " << FilterDensity/(g/cm3) << " g/cm3" << G4endl;

HallMat = Air;
DetectorMat = Ge;
AkenMat = Be;
TyhiMat = Vaakum;
TopsMat = Poly;
YmbrisMat = Al;
FilterMat = PbGlass;
}

G4VPhysicalVolume* DetectorConstruction::ConstructDetector()
{
// Cleanup old geometry
G4PhysicalVolumeStore::GetInstance()->Clean();
}

```

```

G4LogicalVolumeStore::GetInstance()->Clean();
G4SolidStore::GetInstance()->Clean();

// "World", called Hall
if(Hall) delete Hall;
if(logicalHall) delete logicalHall;
if(physicalHall) delete physicalHall;

G4ThreeVector HallPos = G4ThreeVector(0.0*cm, 0.0*cm, 0.0*cm);

////////// Hall ////////////////////////////////////////////
G4double HallX = 570.*mm, HallY = 550.*mm, HallZ = 550.*mm;
Hall = new G4Box("World", HallX/2, HallY/2, HallZ/2);
G4LogicalVolume* logicalHall = new G4LogicalVolume(Hall, HallMat,
"World", 0, 0, 0);
G4VPhysicalVolume* physicalHall = new G4PVPlacement(0, HallPos,
logicalHall, "World", 0, false, 0);

////////// vacuum ////////////////////////////////////////////
G4double TyhiR = 40.*mm, TyhiH = 84.7*mm;
G4ThreeVector TyhiPos = G4ThreeVector(0.*mm, 0.*mm, -66.65*mm);

Tyhi = new G4Tubs("Vaakum", 0.*mm, TyhiR, TyhiH/2, 0.*deg, 360.*deg);
G4LogicalVolume* logicalTyhi = new G4LogicalVolume(Tyhi, TyhiMat,
"Vaakum", 0, 0, 0);
G4VPhysicalVolume* physicalTyhi = new G4PVPlacement(0, TyhiPos,
logicalTyhi, "Vaakum", logicalHall, false, 0);

////////// crystal ////////////////////////////////////////////
G4double CrystR=25.23*mm, CrystH=15.0*mm;
G4ThreeVector DetPos = G4ThreeVector(0.0*mm, 0.0*mm, 28.85*mm);

// Ge crystal

G4double Rmin=0.0*mm, Rmax=CrystR, deltaZ=CrystH/2,
Phimin=0.0*degree, deltaPhi=360*degree;

CrysDetector = new G4Tubs("Ge", Rmin, Rmax, deltaZ, Phimin, deltaPhi);
logicalCrysDetector = new G4LogicalVolume(CrysDetector, DetectorMat,
"Ge");
physicalCrysDetector = new G4PVPlacement(0, DetPos,
logicalCrysDetector, "Ge", logicalTyhi, false, 0);

//dead layer: 0.185 mm
Det1 = new G4Tubs("sensitive Ge", Rmin, Rmax-0.001*mm, deltaZ-
0.0925*mm, Phimin, deltaPhi);
logicalDet1 = new G4LogicalVolume(Det1, DetectorMat, "Ge");
physicalDet1 = new G4PVPlacement(0, G4ThreeVector(0,0,-0.185*mm),
logicalDet1, "sensitive Ge", logicalCrysDetector, false, 0);

////////// SENSITIVE Detector: Ge crystal ////////////////////////////////////////////
G4SDManager* SDman = G4SDManager::GetSDMpointer();

if(!detectorSD) {
    detectorSD = new DetectorSD("DetectorSD", this);
    SDman->AddNewDetector(detectorSD);
}
logicalDet1->SetSensitiveDetector(detectorSD);

```

```

//////////////////// Be window //////////////////////
G4double AkenR = 40.*mm, AkenH = 0.3*mm;
G4ThreeVector AkenPos = G4ThreeVector(0.0*mm, 0.0*mm, -24.15*mm);

Aken = new G4Tubs("Be aken", 0.*mm, AkenR, AkenH/2, 0.*deg, 360.*deg);
G4LogicalVolume* logicalAken = new G4LogicalVolume(Aken, AkenMat, "Be
aken", 0, 0, 0);
G4VPhysicalVolume* physicalAken = new G4PVPlacement(0, AkenPos,
logicalAken, "Be aken", logicalHall, false, 0);

//////////////////// Al //////////////////////
//////////////////// 1
G4double Ymbrisr1 = 40.*mm, YmbrisR1 = 41.5*mm, YmbrisH1 = 85.*mm;
G4ThreeVector YmbrisPos1 = G4ThreeVector(0.0*mm, 0.0*mm, -66.5*mm);

Ymbris1 = new G4Tubs("Al ümber detektori", Ymbrisr1, YmbrisR1,
YmbrisH1/2, 0.*deg, 360.*deg);
G4LogicalVolume* logicalYmbris1 = new G4LogicalVolume(Ymbris1,
YmbrisMat, "Al ümber detektori", 0, 0, 0);
G4VPhysicalVolume* physicalYmbris1 = new G4PVPlacement(0, YmbrisPos1,
logicalYmbris1, "Al ümber detektori", logicalHall, false, 0);
//////////////////// 2
G4double Ymbrisr2 = 0.*mm, YmbrisR2 = 44.*mm, YmbrisH2 = 2.*mm;
G4ThreeVector YmbrisPos2 = G4ThreeVector(0.0*mm, 0.0*mm, -110.0*mm);

Ymbris2 = new G4Tubs("Al detektori all", Ymbrisr2, YmbrisR2,
YmbrisH2/2, 0.*deg, 360.*deg);
G4LogicalVolume* logicalYmbris2 = new G4LogicalVolume(Ymbris2,
YmbrisMat, "Al detektori all", 0, 0, 0);
G4VPhysicalVolume* physicalYmbris2 = new G4PVPlacement(0, YmbrisPos2,
logicalYmbris2, "Al detektori all", logicalHall, false, 0);
//////////////////// 3
G4double Ymbrisr3 = 42.*mm, YmbrisR3 = 44.*mm, YmbrisH3 = 112.*mm;
G4ThreeVector YmbrisPos3 = G4ThreeVector(0.0*mm, 0.0*mm, -167.0*mm);

Ymbris3 = new G4Tubs("Al detektori all", Ymbrisr3, YmbrisR3,
YmbrisH3/2, 0.*deg, 360.*deg);
G4LogicalVolume* logicalYmbris3 = new G4LogicalVolume(Ymbris3,
YmbrisMat, "Al detektori all", 0, 0, 0);
G4VPhysicalVolume* physicalYmbris3 = new G4PVPlacement(0, YmbrisPos3,
logicalYmbris3, "Al detektori all", logicalHall, false, 0);

//////////////////// beaker //////////////////////
//////////////////// 1
G4double Topsr1 = 0.*mm, TopsR1 = 23.*mm, TopsH1 = 2.*mm;
G4ThreeVector TopsPos1 = G4ThreeVector(0.0*mm, 0.0*mm, 4.*mm);

Tops1 = new G4Tubs("mõõtetopsi lagi", Topsr1, TopsR1, TopsH1/2, 0.*deg,
360.*deg);
G4LogicalVolume* logicalTops1 = new G4LogicalVolume(Tops1, TopsMat,
"mõõtetopsi lagi", 0, 0, 0);
G4VPhysicalVolume* physicalTops1 = new G4PVPlacement(0, TopsPos1,
logicalTops1, "mõõtetopsi lagi", logicalHall, false, 0);
//////////////////// 2
G4double Topsr2 = 21.*mm, TopsR2 = 23.*mm, TopsH2 = 25.5*mm;
G4ThreeVector TopsPos2 = G4ThreeVector(0.0*mm, 0.0*mm, -9.75*mm);

Tops2 = new G4Tubs("mõõtetopsi keskosa", Topsr2, TopsR2, TopsH2/2,
0.*deg, 360.*deg);

```

```

    G4LogicalVolume* logicalTops2 = new G4LogicalVolume(Tops2, TopsMat,
    "mõõtetopsi keskosa", 0, 0, 0);
    G4VPhysicalVolume* physicalTops2 = new G4PVPlacement(0, TopsPos2,
    logicalTops2, "mõõtetopsi keskosa", logicalHall, false, 0);
    ////////////////////////////////////////////////// 3
    G4double Topsr3 = 0.*mm, TopsR3 = 23.*mm, TopsH3 = 1.5*mm;
    G4ThreeVector TopsPos3 = G4ThreeVector(0.0*mm, 0.0*mm, -23.25*mm);

    Tops3 = new G4Tubs("mõõtetopsi põhi", Topsr3, TopsR3, TopsH3/2, 0.*deg,
    360.*deg);
    G4LogicalVolume* logicalTops3 = new G4LogicalVolume(Tops3, TopsMat,
    "mõõtetopsi põhi", 0, 0, 0);
    G4VPhysicalVolume* physicalTops3 = new G4PVPlacement(0, TopsPos3,
    logicalTops3, "mõõtetopsi põhi", logicalHall, false, 0);

    ////////////////////////////////////////////////// air filter////////////////////////////////////
    G4double Filterr = 0.*mm;

    Filter = new G4Tubs("õhufilter", Filterr, FilterR, FilterH/2, 0.*deg,
    360.*deg);
    G4LogicalVolume* logicalFilter = new G4LogicalVolume(Filter, FilterMat,
    "aerosoolifilter", 0, 0, 0);
    G4VPhysicalVolume* physicalFilter = new G4PVPlacement(0, FilterPos,
    logicalFilter, "filter", logicalHall, false, 0);

G4cout << "Filtri raadius: " << FilterR/mm << " mm" << G4endl << "Filtri
paksus: " << FilterH/mm << " mm" << G4endl << "Filtri koorinaadid: " <<
FilterPos << G4endl;

    //////////////////////////////////////////////////
    //
    // Visualization //
    /// Hall // white
    G4VisAttributes* visAtt1= new G4VisAttributes(G4Colour(1.0,1.0,1.0));
    visAtt1->SetVisibility(false);
    logicalHall ->SetVisAttributes(visAtt1);

    /// detector // blue
    G4VisAttributes* visAtt2= new G4VisAttributes(G4Colour(0.0,0.0,1.0));
    visAtt2->SetVisibility(true);
    logicalCrysDetector ->SetVisAttributes(visAtt2);

    /// beaker //magenta
    G4VisAttributes* visAtt3= new G4VisAttributes(G4Colour(1.0,0.0,1.0));
    visAtt3->SetVisibility(true);
    logicalTops1 ->SetVisAttributes(visAtt3);
    logicalTops2 ->SetVisAttributes(visAtt3);
    logicalTops3 ->SetVisAttributes(visAtt3);

    /// Al cryostat // gray
    G4VisAttributes* visAtt4= new G4VisAttributes(G4Colour(0.5,0.5,0.5));
    visAtt4->SetVisibility(true);
    logicalYmbris1 ->SetVisAttributes(visAtt4);
    logicalYmbris2 ->SetVisAttributes(visAtt4);
    logicalYmbris3 ->SetVisAttributes(visAtt4);

    /// Be window//cyan
    G4VisAttributes* visAtt5= new G4VisAttributes(G4Colour(0.0,1.0,1.0));
    visAtt5->SetVisibility(true);

```

```
logicalAken ->SetVisAttributes(visAtt5);

/// air filter //yellow
G4VisAttributes* visAtt6 = new G4VisAttributes(G4Colour(1.0, 1.0,
0.0));
visAtt6->SetVisibility(true);
logicalFilter ->SetVisAttributes(visAtt6);

/// sensitive detector //white
G4VisAttributes* visAtt7 = new G4VisAttributes(G4Colour(1.0, 1.0,
1.0));
visAtt7->SetVisibility(true);
logicalDet1->SetVisAttributes(visAtt7);

return physicalHall;
}
```

## PhysicsList.cc

```
#include "PhysicsList.hh"

#include "G4ParticleDefinition.hh"
#include "G4ParticleWithCuts.hh"
#include "G4ProcessManager.hh"
#include "G4ParticleTypes.hh"
#include "G4ParticleTable.hh"
#include "G4ios.hh"

PhysicsList::PhysicsList()
: G4VUserPhysicsList()
{
    defaultCutValue = 0.001*mm;
    SetVerboseLevel(1);
}

PhysicsList::~~PhysicsList()
{}

void PhysicsList::ConstructParticle()
{
    ConstructBosons();
    ConstructLeptons();
}

void PhysicsList::ConstructBosons()
{
    // gamma
    G4Gamma::GammaDefinition();
    // optical photon
    G4OpticalPhoton::OpticalPhotonDefinition();
}

void PhysicsList::ConstructLeptons()
{
    // leptons
    G4Electron::ElectronDefinition();
}

void PhysicsList::ConstructProcess()
{
    AddTransportation();
    ConstructEM();
}
#include "G4MultipleScattering.hh"
// gamma
#include "G4LowEnergyRayleigh.hh"
#include "G4LowEnergyPhotoElectric.hh"
#include "G4LowEnergyCompton.hh"
#include "G4LowEnergyGammaConversion.hh"
// e-
#include "G4LowEnergyIonisation.hh"
#include "G4LowEnergyBremsstrahlung.hh"

void PhysicsList::ConstructEM()
{
    theParticleIterator->reset();
}
```

```

while( (*theParticleIterator)() ){
  G4ParticleDefinition* particle = theParticleIterator->value();
  G4ProcessManager* pmanager = particle->GetProcessManager();
  G4String particleName = particle->GetParticleName();

  if (particleName == "gamma") {
    // gamma
    lowePhot = new G4LowEnergyPhotoElectric("LowEnergyPhotoElectric");
    pmanager->AddDiscreteProcess(new G4LowEnergyRayleigh);
    pmanager->AddDiscreteProcess(lowePhot);
    pmanager->AddDiscreteProcess(new G4LowEnergyCompton);
    pmanager->AddDiscreteProcess(new G4LowEnergyGammaConversion);

  } else if (particleName == "e-") {
    //electron
    loweIon = new G4LowEnergyIonisation("LowEnergyIoni");
    loweBrem = new G4LowEnergyBremsstrahlung("LowEnBrem");

    pmanager->AddProcess(new G4MultipleScattering,-1, 1,1);
    pmanager->AddProcess(loweIon,      -1, 2,2);
    pmanager->AddProcess(loweBrem,    -1,-1,3);
  }
}

void PhysicsList::SetCuts()
{
  if (verboseLevel >0){
    G4cout << "PhysicsList::SetCuts:";
    G4cout << "CutLength : " << defaultCutValue/mm << " (mm)" << G4endl;
  }

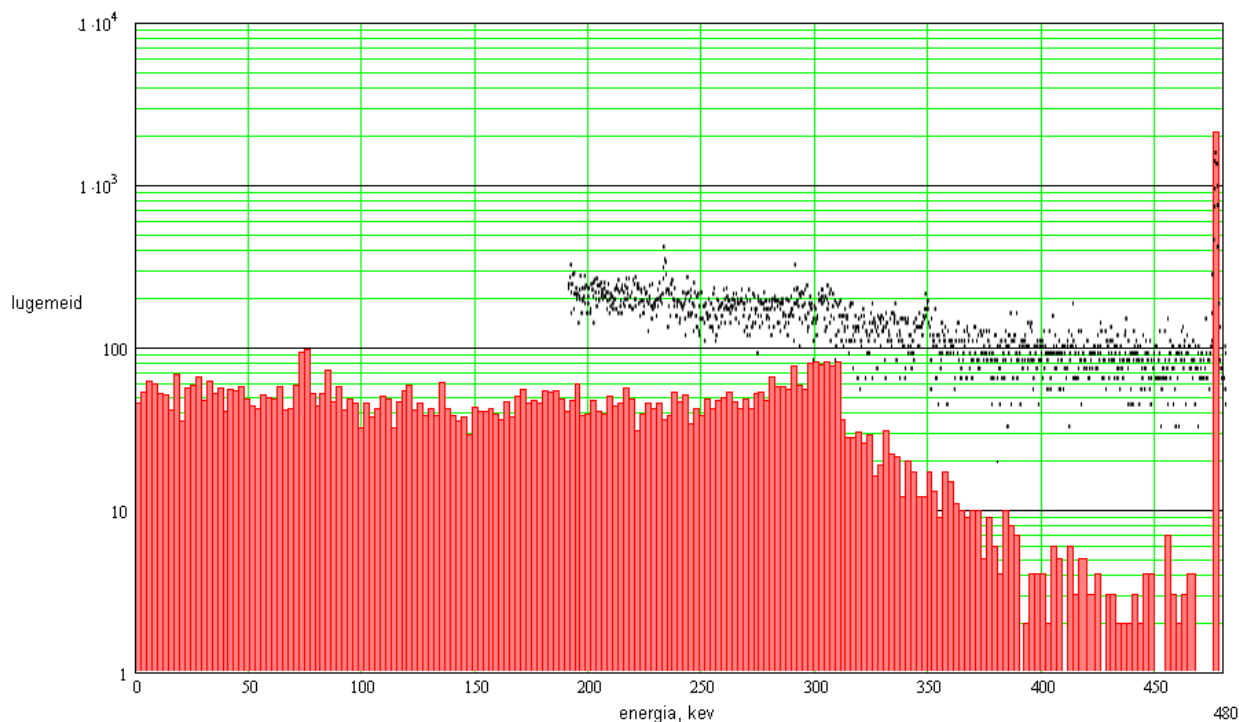
  // set cut values for gamma at first and for e- second and next for e+,
  // because some processes for e- need cut values for gamma
  SetCutValue(defaultCutValue, "gamma");
  SetCutValue(defaultCutValue, "e-");

  if (verboseLevel>0) DumpCutValuesTable();
}

```

## LISA 2

Näide Geant4 madalate energiatega jaoks kirjutatud füüsikaklasside kasutamisest 477 keV gammafootonite simuleerimisel. Narva-Jõesuu filtri mudelis on genereeritud 100 000 footonit, mille energiaspektrit võrreldakse mõõdetud spektriga (joonis 24).



**Joonis 25. Näide suurema energiaga footonite spektrist. Narva-Jõesuu proovi mudelis on genereeritud 100 000 footonit energiaga 477 keV (histogramm) ning võrdluseks on Narva-Jõesuu filtrist mõõdetud spekter, berüllium-7 fotojoon paremal.**