Analys av Minsta Detekterbara Aktivitet i gamma-koincidensspektrometern GeCo

Ellen Ivarsson Biebel*, Erik Andersson Sundén, Peter Andersson

*ellenivarssonbiebel@hotmail.se

1 oktober 2025

1 Inledning

Denna rapport redovisar en forsättning på en studie inom koincidensspektrometri som ett verktyg för att förbättra känsligheten i mätningar av radionuklider i atmosfären. Arbetet har genomförts inom projektet Coincidence Spectrometry for Radionuclide monitoring (CoSpeR), ett samarbete mellan Uppsala universitet (UU) och Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), finansierat av Vetenskapsrådet (diarienummer 2023-05046) och med stöd från Alva Myrdal Centrum för kärnvapennedrustning (AMC). Inom CoSpeR konstruerades tidigare testuppställningen GeCo, bestående av fem germaniumdetektorer, med syfte att öka kunskap och färdigheter kring avancerade detektorarrangemang och tillhörande dataanalys. Tidigare arbete har även omfattat energi- och effektivitetskalibrering med hjälp av luftfilter dopade med kalibreringsnuklider [3]. I den föreliggande studien har känsligheten beräknats i form av Minsta Detekterbara Aktivitet (MDA), med fokus på en jämförelse mellan koincidensdetektion och single-gamma detektion i de enskilda detektorelementen, och för att bidra till förståelse för parametrar av betydelse för att öka känsligheten. Analysen baseras på tidigare insamlad rådata publicerad i [2].

2 Projektbeskrivning

I den första delen av projektet fortsattes analysen av kalibreringsprovet bland annat innehållande Cs-134. Målet var att inkludera alla fem germaniumdetektorer, HPGe1 - HPGe5, i analysen av koincidenser och därefter beräkna crtical limit (L_C), detection limit (L_D), och minimum detectable activity (MDA). De olika gränserna skulle beräknas för tre fall, först för singeldetektor spektra (när endast en detektor kollas på samtidigt) sedan för koincidens mellan möjliga detektorpar och sist för koincidens med gating där enbart peak-peak betraktas.

I projektets andra del analyserades kalibreringsprovet innehållandes Co-60. Till att börja med ämnades att genomföra en energikalibrering för singelspektra och effektiviteterna beräknades för toppar i kalibreringsprovet. Därefter skulle de koincidenta effektiviteterna för varje par av detektorer tas fram. Slutligen var målet att också beräkna crtical limit (L_C), detection limit (L_D), och minimum detectable activity (MDA) också för det andra kalibreringsprovet. Gränserna skulle beräknas för samma tre fall nämnda i förra stycket.

3 Metod

Som förberedelse för projektet så plockades alla koincidenser fram. Här betraktades två händelser som koincidenta om gamma kunde mätas i två olika detektorer med kortare tidsskillnad än 400 ns. De koincidenta händelserna sparades för alla detektorpar för att sedan analyseras.

3.1 Del 1

Projektet inleddes med att inkludera HPGe5 i analysen av koincidenser. Detta skulle göras för alla detektorpar där HPGe5 ingick. För att hitta antalet counts i peak-peak valdes ett intervall i energin uppmätt i en av detektorerna, antingen runt 605 keV eller runt 795 keV, och antalet counts i det intervallet projicerades på den andra detektorn i paret. I det spektrum som då erhölls kunde Gedckes metod användas för att få fram antalet counts i den topp som var av intresse, 795 eller 605 keV beroende på valet av gating. I Gedckes metod väljs en region of interest (ROI) och två bakgrundregioner. Här valdes region of interest precis som vid analys av tidigare detektorpar genom att plotta spektrat och visuellt bestämma var toppen började och slutade. Bakgrundsregionerna valdes på lika stora avstånd från ROI och för enkelhetens skull hälften så breda som ROI. Avståndet till ROI bestämdes också efter plottning av spektra beroende på avstånd till andra toppar som kan interferera i bakgrundsmätningen på ett oönskat sätt.

Efter att HPGe5 inkluderats beräknades kritisk gräns och detektionsgräns för energierna 605 och 795 keV. För att göra det krävs det att antalet counts i bakgrunden inom intervallet av intresse är känt. Här beslutades att intervallets bredd för varje topp skulle vara 2 FWHM, dvs 2,355 standardavvikelser åt varje håll, och mitten på intervallet skulle sammanfalla med toppens högsta punkt. Det prov som användes var UV2404, en mätning av ett icke-preparerat filter, så att alla counts i provet kan betraktas som bakgrundscounts. För singelspektra summerades alla uppmätta counts i ett valt intervall. Därefter beräknas den kritiska gränsen (L_C) genom sambandet [1]

$$\mathrm{L}_C = 2,33\sqrt{B} \tag{1}$$

där B är antalet counts i bakgrunden. På liknande sätt beräknas detektionsgränsen (L_D) som [1]

$$\mathrm{L}_D = 2,71 + 4,65\sqrt{B} \tag{2}$$

där B återigen är antalet counts i bakgrunden. Till sist beräknas minimum detectable activity (MDA) med sambandet [1]

$$\mathrm{MDA} = \frac{\mathrm{L}_D}{T \cdot \varepsilon \cdot I_\gamma} \tag{3}$$

där T är tiden under vilken mätningen har genomförts, ε är detektorns effektivitet vid den relevanta energin och I emissionsintensiteten eller sannolikheten att en gammaemission sker med den relevanta energin.

De tre gränserna beräknades först för fallet utan koincidens, alltså för enskilda mätningar i var och en av detektorerna. Därefter beräknades gränserna för koincidens i alla möjliga detektorpar projicerat på på båda möjliga detektorer i paret. Effektiviteten som i det fallet bör användas i ekvation 3 är den koincidenta effektiviteten för peak-kontinuum. Denna effektivitet har inte beräknats och det blir svårt att göra det eftersom intensiteten för peak-kontinuum inte är ett tabellvärde som är enkel att finna. Därför skrivs ekvation 3 om med

$$\varepsilon = \frac{c}{T_1 A I_\gamma} \tag{4}$$

vilket ger

$$\mathrm{MDA} = \frac{\mathrm{L}_D A T_1}{T_2 c} \tag{5}$$

där A är aktiviteten i kalibreringsprovet, T_1 tiden under vilken mätningen av kalibreringsprovet utförs och c antalet counts som mäts i kalibreringsprovet under den tiden. Liksom innan är L_D och T_2 baserade på mätningen av bakgrundsaktivitet.

L_C och L_D beräknades på samma sätt som för singelspektra också för alla koincidensspektra utan gating. Antalet counts i peak-kontinuum för kalibreringsprovet togs fram med Gedckes metod (på samma sätt som beskrivet för utökningen av effektivitetskalibreringen) och med ekvation 5 beräknades minimum detectable activity också för koincidensspektra. Antalet counts i bakgrundsmätningen extraherades genom att summera alla counts inom samma intervall som användes för att finna counts i bakgrundmätningen för singelspektra.

Därefter gateades koincididensmätningen av UV2404 kring först 605 och sedan 795 keV. Det gateade spektrat summerades ner på den detektor där gatingen inte gjordes och antalet counts kring 795 eller 605 keV hittades. Samma intervall användes som i de två tidigare fallen så att antalet counts skulle vara

jämförbara. Här undersöktes dock peak-peak koincidenser. Antalet bakgrundscounts i peak-peak var så få att approximationen med normalfördelade toppar inte kunde göras. Därför kunde inte heller ekvationerna 1 och 2 användas för att beräkna kritiska gränsen och detektionsgränsen. Istället används Poissonstatistik och definitionerna av L_C och L_D.

Den kritiska gränsen, L_C, är den gräns över vilken en lägre andel än α av alla bakgrundscounts befinner sig. Det är den gräns över vilken det är mindre än $\alpha*100\%$ sannolikhet att det som mäts hör till bakgrunden, alltså $(1-\alpha)*100\%$ sannolikhet att det som mäts är en intressant topp. Eftersom sönderfall är Poissonfördelade är sannolikheten för n sönderfall givet uppmätt antalet counts i bakgrunden B

$$P(n) = \frac{B^n}{n!}e^{-B} \tag{6}$$

Sannolikheten att det sker fler än n sönderfall är då given av

$$P(c \geq n) = \sum_{i=n}^{\infty} \frac{B^i}{i!}e^{-B} \tag{7}$$

och om antalet counts med $\alpha * 100\%$ sannolikhet ska vara fler än n så måste villkoret

$$\sum_{i=n}^{\infty} \frac{B^i}{i!}e^{-B} \leq \alpha \tag{8}$$

vara uppfyllt. Den kritiska gränsen L_C är då det minsta antalet counts n för vilket villkoret är uppfyllt. För de olika områden där antalet counts, B, i bakgrunden (UV2404) togs fram beräknades summan för olika n. Konfidensintervallet valdes till $\alpha = 0,05$, dvs 95% av antalet counts är under den kritiska gränsen.
Vidare är detektionsgränsen L_D det antal counts $B + S$ för vilket sannolikheten (med Poissionstatistik) är $(1-\beta)*100\%$ att antalet sönderfall är över den kritiska gränsen. Det innebär att L_D är det minsta värdet på $B + S$ för vilket villkoret

$$\sum_{i=L_C}^{\infty} \frac{(B+S)^i}{i!}e^{-(B+S)} \geq 1-\beta \tag{9}$$

är uppfyllt. I det här fallet valdes $\beta = \alpha = 0,05$ och summan räknades ut för olika $B + S$ tills det lägsta värdet hittades för varje L_C. Observera att L_C måste vara ett heltal för att kunna användas för att beräkna L_D som sedan inte behöver vara ett heltal utan här beräknades med en decimal. För att använda de här uttrycken i beräkningen av gränserna måste gälla att $B \geq 0$. I de fall där $B = 0$ beräknades gränserna här genom att sätta $B = 0,1$ i uttrycken. Lämpligheten i det bör diskuteras men det var vad som kunde göras med den tidsbegränsning som rådde. Därefter beräknades minimum detectable activity med ekvation 3.

3.2 Del 2

Den andra delen av projektet gick ut på att analysera det kalibreringsprov som innehöll Co-60. Det första som gjordes var en energikalibrering och beräkningar av effektiviteten för de toppar som fanns i kalibreringsprovet. Det gjordes på samma sätt som med det första kalibreringsprovet (se kandidatarbete). Återigen användes kurvanpassningen också för att hitta antalet counts, det var enklast i och med att koden redan fanns. Därefter togs alla koincidenta event fram och gateades på 1173 eller 1332 keV i en detektor i paret för att sedan summeras ner på den detektor där gatingen inte gjordes. Därefter användes Gedckes metod för att hitta antalet counts i topparna vid 1332 respektive 1173 keV och peak-peak koincidensen beräknades. Denna peak-peak koincidens sammanställdes för alla detektorpar och jämfördes med produkten av singeleffektiviteterna för de ingående detektorerna. De koincidenta eventen mellan detektorparen plottades i 2D-histogram. Alla 2D-histogram projiceras ner på den detektor som kallas A för att kunna behandlas på samma sätt som ett 1D-histogram.

Slutligen togs critical limit, L_C, detection limit, L_D, och minimum detectable activity, MDA, fram också för energierna 1173 och 1332 keV, på samma sätt som beskrivet i sektion 3.1. Även här togs gränserna fram för singelspektra, icke-gated koincidens och koincidens med gating.

4 Resultat

4.1 Del 1

Tabell 1 är den påfyllda tabellen över effektiviteter för koincidenta händelser. Den inkluderar nu också HPGe5. Den statistiska avvikelsen är större i par som inkluderar HPGe5, inget fel i beräkningarna kunde hittas och samma kod användes för alla par så det beror troligen på det lägre antalet counts i topparna.

Tiden under vilken mätningarna på UV2404 genomfördes var $4,60759403 \cdot 10^5$ sekunder, det användes som tiden T i ekvation 3. Tabell 2 visar den kritiska gränsen, detektionsgränsen och minimum detectable activity för energierna 605 keV och 795 keV för alla detektorer betraktade var och en för sig, okorrelerade. Tabell 3 visar samma gränser för samma energier för alla detektorpar projicerade på båda möjliga detektorer i paret. I tabell 4 syns motsvarande för gated koincidens. Vid jämförelse av tabellerna syns att MDA ökar vid första undersökningen av koincidens, dvs. vid peak-kontinuum koincidens. När gating genomfördes och peak-peak koincidens betraktades sjönk återigen MDA, i vissa fall lägre än den varit från början.

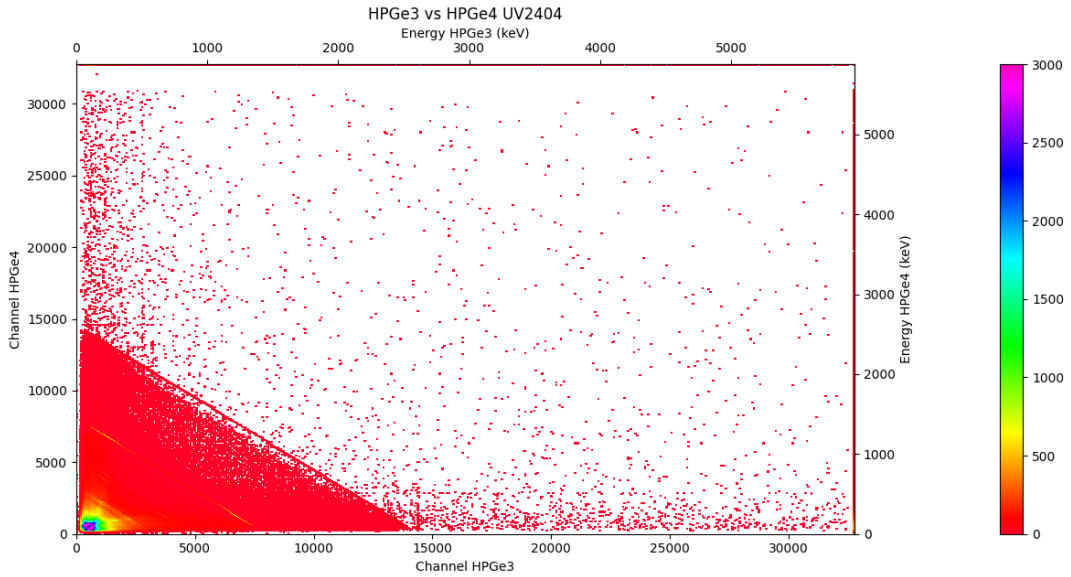
I figur 1 syns ett 2D-histogram som visar energin för de händelser som sker koincident mellan HPGe3 och HPGe4. Samma histogram, inzoomat på det område där de flesta händelser inträffar, syns i figur 2.

Tabell 1: Utökad tabell över koincidenta effektiviteter, inkluderat HPGe5

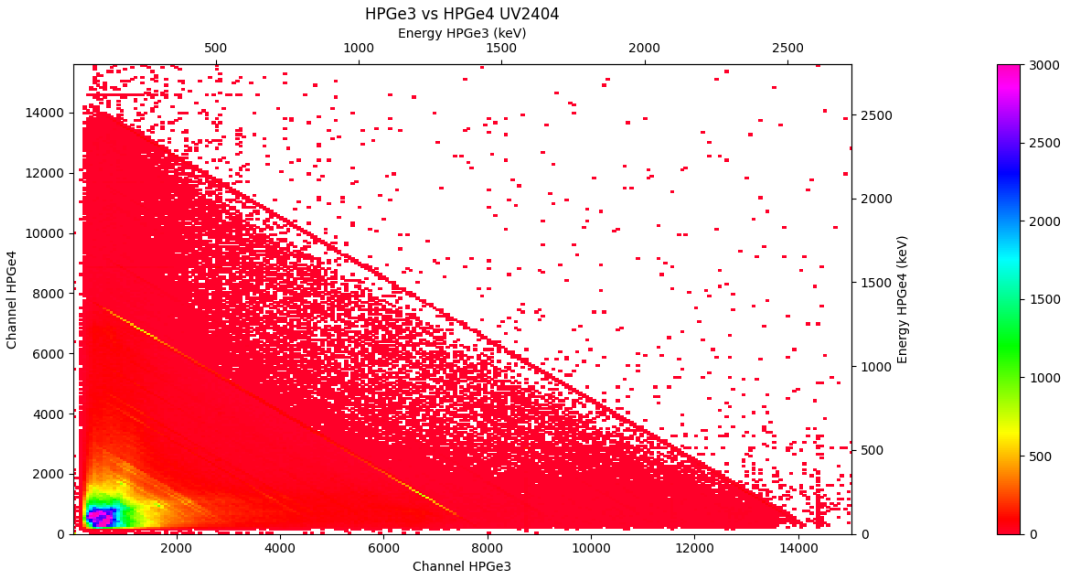
Detector A	Detector B	Energy A (keV)	Energy B (keV)	Peak-peak counts	Background counts	Coincidence efficiency	Efficiency product ($\varepsilon_A \cdot \varepsilon_B$)	Correction $\rho \pm \sigma_\rho$
HPGe1	HPGe2	795	605	454	7	$2,57 \cdot 10^{-5} \pm 0,12 \cdot 10^{-5}$	$3,02026 \cdot 10^{-5}$	$0,851 \pm 0,047$
HPGe1	HPGe2	605	795	391	4	$2,21 \cdot 10^{-5} \pm 0,11 \cdot 10^{-5}$	$2,95574 \cdot 10^{-5}$	$0,749 \pm 0,043$
HPGe1	HPGe3	795	605	1385	12	$7,84 \cdot 10^{-5} \pm 0,21 \cdot 10^{-5}$	$7,01905 \cdot 10^{-5}$	$1,117 \pm 0,042$
HPGe1	HPGe3	605	795	1387	6	$7,85 \cdot 10^{-5} \pm 0,21 \cdot 10^{-5}$	$6,89181 \cdot 10^{-5}$	$1,140 \pm 0,042$
HPGe1	HPGe4	795	605	1268	21	$7,18 \cdot 10^{-5} \pm 0,21 \cdot 10^{-5}$	$6,61776 \cdot 10^{-5}$	$1,085 \pm 0,042$
HPGe1	HPGe4	605	795	1202	6	$6,81 \cdot 10^{-5} \pm 0,20 \cdot 10^{-5}$	$6,47289 \cdot 10^{-5}$	$1,052 \pm 0,041$
HPGe1	HPGe5	795	605	260	1	$1,472 \cdot 10^{-5} \pm 0,092 \cdot 10^{-5}$	$1,31051 \cdot 10^{-5}$	$1,123 \pm 0,077$
HPGe1	HPGe5	605	795	274	0	$1,552 \cdot 10^{-5} \pm 0,094 \cdot 10^{-5}$	$1,71111 \cdot 10^{-5}$	$0,907 \pm 0,061$
HPGe2	HPGe3	795	605	990	9	$5,61 \cdot 10^{-5} \pm 0,18 \cdot 10^{-5}$	$5,14082 \cdot 10^{-5}$	$1,091 \pm 0,045$
HPGe2	HPGe3	605	795	927	10	$5,25 \cdot 10^{-5} \pm 0,18 \cdot 10^{-5}$	$5,1578 \cdot 10^{-5}$	$1,018 \pm 0,043$
HPGe2	HPGe4	795	605	878	4	$4,97 \cdot 10^{-5} \pm 0,17 \cdot 10^{-5}$	$4,84691 \cdot 10^{-5}$	$1,026 \pm 0,44$
HPGe2	HPGe4	605	795	932	4	$5,28 \cdot 10^{-5} \pm 0,17 \cdot 10^{-5}$	$4,84428 \cdot 10^{-5}$	$1,089 \pm 0,045$
HPGe2	HPGe5	795	605	182	1	$1,031 \cdot 10^{-5} \pm 0,077 \cdot 10^{-5}$	$9,59832 \cdot 10^{-6}$	$1,074 \pm 0,086$
HPGe2	HPGe5	605	795	222	1	$1,257 \cdot 10^{-5} \pm 0,085 \cdot 10^{-5}$	$1,28059 \cdot 10^{-5}$	$0,982 \pm 0,073$
HPGe3	HPGe4	795	605	2097	58	$11,88 \cdot 10^{-5} \pm 0,27 \cdot 10^{-5}$	$11,3014 \cdot 10^{-5}$	$1,051 \pm 0,036$
HPGe3	HPGe4	605	795	2258	13	$12,79 \cdot 10^{-5} \pm 0,28 \cdot 10^{-5}$	$11,2581 \cdot 10^{-5}$	$1,136 \pm 0,038$
HPGe3	HPGe5	795	605	444	11	$2,51 \cdot 10^{-5} \pm 1,2 \cdot 10^{-5}$	$2,23801 \cdot 10^{-5}$	$1,123 \pm 0,063$
HPGe3	HPGe5	605	795	489	3	$2,77 \cdot 10^{-5} \pm 1,3 \cdot 10^{-5}$	$2,97608 \cdot 10^{-5}$	$0,930 \pm 0,051$
HPGe4	HPGe5	795	605	427	4	$2,42 \cdot 10^{-5} \pm 1,2 \cdot 10^{-5}$	$2,10197 \cdot 10^{-5}$	$1,150 \pm 0,064$
HPGe4	HPGe5	605	795	499	2	$2,83 \cdot 10^{-5} \pm 1,3 \cdot 10^{-5}$	$2,80593 \cdot 10^{-5}$	$1,007 \pm 0,055$

Tabell 2: L_C, L_D och MDA för singelspektra för alla detektorer, inkluderat de parametrar som används för att beräkna MDA.

Detektor	Energy (keV)	Critical limit (counts)	Detection limit (counts)	Efficiency	Intensity (%)	MDA (Bq)
HPGe1	605	667,662	1335,17	0,00727983	97,62	0,407757
HPGe1	795	653,556	1307,02	0,00554359	85,46	0,598760
HPGe2	605	536,993	1074,39	0,00544820	97,62	0,438427
HPGe2	795	513,558	1027,62	0,00406018	85,46	0,642764
HPGe3	605	583,464	1167,13	0,0126616	97,62	0,204937
HPGe3	795	542,725	1085,83	0,00946700	85,46	0,291281
HPGe4	605	543,784	1087,94	0,0119377	97,62	0,202616
HPGe4	795	512,372	1025,26	0,00889154	85,46	0,292832
HPGe5	605	700,362	1400,43	0,00236402	97,62	1,31704
HPGe5	795	676,519	1352,84	0,00235049	85,46	1,46168



Figur 1: Koincidenserna mellan HPGe3 och HPGe4 för bakgrundsprovet UV2404.



Figur 2: Koincidenserna mellan HPGe3 och HPGe4 för bakgrundsprovet UV2404, inzoomat på området med flest händelser.

Tabell 3: L_C, L_D och MDA för projicerade koincidensspektra för alla detektorpar och möjliga projektioner. Inkluderar också antalet counts i kalibreringsprovet för beräkningarna.

Detector A	Detector B	Energi (keV)	Critical limit	Detection limit	Counts calibration sample	MDA (Bq)
HPGe1	HPGe2	605	51,7868	106,061	3852	1,23712
HPGe1	HPGe2	795	43,7767	90,0756	2855	1,41756
HPGe1	HPGe3	605	88,6932	179,716	10300	0,783951
HPGe1	HPGe3	795	78,4971	159,367	7394	0,968412
HPGe1	HPGe4	605	89,6066	181,539	8511	0,958360
HPGe1	HPGe4	795	78,4626	159,298	5978	1,19728
HPGe1	HPGe5	605	26,9717	56,5376	1153	2,20317
HPGe1	HPGe5	795	23,6469	49,9023	780	2,87453
HPGe2	HPGe1	605	46,0138	94,5401	3360	1,26420
HPGe2	HPGe1	795	43,9624	90,4460	2259	1,79893
HPGe2	HPGe3	605	79,1514	160,673	8096	0,891688
HPGe2	HPGe3	795	69,6276	141,666	5199	1,22429
HPGe2	HPGe4	605	79,5278	161,424	6444	1,12552
HPGe2	HPGe4	795	68,5274	139,471	4295	1,45901
HPGe2	HPGe5	605	23,4162	49,4419	833	2,66680
HPGe2	HPGe5	795	21,7328	46,0823	517	4,00483
HPGe3	HPGe1	605	89,5460	181,418	10366	0,786337
HPGe3	HPGe1	795	75,3927	153,172	6595	1,04353
HPGe3	HPGe2	605	81,2499	164,861	8963	0,826427
HPGe3	HPGe2	795	71,5504	145,504	5564	1,17497
HPGe3	HPGe4	605	84,3318	171,012	15523	0,494983
HPGe3	HPGe4	795	72,5674	147,533	10288	0,644317
HPGe3	HPGe5	605	39,9512	82,4409	1998	1,85390
HPGe3	HPGe5	795	36,0962	74,7475	1305	2,57351
HPGe4	HPGe1	605	85,6414	173,625	8966	0,870070
HPGe4	HPGe1	795	72,7169	147,832	5884	1,12885
HPGe4	HPGe2	605	76,1450	154,673	7727	0,899382
HPGe4	HPGe2	795	65,8199	134,067	5296	1,13741
HPGe4	HPGe3	605	79,7664	161,900	16809	0,432759
HPGe4	HPGe3	795	68,1301	138,678	11197	0,556475
HPGe4	HPGe5	605	35,3362	73,2307	2464	1,33534
HPGe4	HPGe5	795	30,29	63,16	1595	1,77919
HPGe5	HPGe1	605	34,3230	71,2088	1866	1,71460
HPGe5	HPGe1	795	30,1102	62,8012	1275	2,21309
HPGe5	HPGe2	605	33,7649	70,0949	1673	1,88248
HPGe5	HPGe2	795	25,73569	54,0709	1146	2,11992
HPGe5	HPGe3	605	44,8184	92,1545	3493	1,18538
HPGe5	HPGe3	795	37,4978	77,5447	2383	1,46207
HPGe5	HPGe4	605	43,2778	89,0799	3397	1,17821
HPGe5	HPGe4	795	37,9297	78,4065	2422	1,45451

Tabell 4: L_C, L_D och MDA för projicerade koincidensspektra med gating för alla detektorpar och möjliga projektioner. Inkluderar också de parametrar som användes vid beräkningen av MDA.

Detector A	Detector B	Energy A	Energy B	Critical limit	Detection limit	Efficiency	Intensity	MDA (Bq)
HPGe1	HPGe2	605	795	4	7,8	$2{,}21418 \cdot 10^{-5}$	0,853	0,896309
HPGe1	HPGe2	795	605	4	7,8	$2{,}57094 \cdot 10^{-5}$	0,853	0,771932
HPGe1	HPGe3	605	795	7	11,9	$7{,}85440 \cdot 10^{-5}$	0,853	0,385488
HPGe1	HPGe3	795	605	6	10,5	$7{,}84308 \cdot 10^{-5}$	0,853	0,340627
HPGe1	HPGe4	605	795	4	7,8	$6{,}80677 \cdot 10^{-5}$	0,853	0,291562
HPGe1	HPGe4	795	605	9	14,5	$7{,}18052 \cdot 10^{-5}$	0,853	0,513794
HPGe1	HPGe5	605	795	4	7,8	$1{,}55163 \cdot 10^{-5}$	0,853	1,279040
HPGe1	HPGe5	795	605	2	3	$1{,}47235 \cdot 10^{-5}$	0,853	0,518427
HPGe2	HPGe1	605	795	4	7,8	$2{,}58227 \cdot 10^{-5}$	0,853	0,768546
HPGe2	HPGe1	795	605	4	7,8	$2{,}16322 \cdot 10^{-5}$	0,853	0,917427
HPGe2	HPGe3	605	795	6	10,5	$5{,}24948 \cdot 10^{-5}$	0,853	0,508920
HPGe2	HPGe3	795	605	6	10,5	$5{,}60624 \cdot 10^{-5}$	0,853	0,476534
HPGe2	HPGe4	605	795	7	11,9	$5{,}27780 \cdot 10^{-5}$	0,853	0,573682
HPGe2	HPGe4	795	605	6	10,5	$4{,}97200 \cdot 10^{-5}$	0,853	0,537322
HPGe2	HPGe5	605	795	2	3	$1{,}25716 \cdot 10^{-5}$	0,853	0,607167
HPGe2	HPGe5	795	605	6	10,5	$1{,}03064 \cdot 10^{-5}$	0,853	2,592137
HPGe3	HPGe1	605	795	7	11,9	$7{,}92236 \cdot 10^{-5}$	0,853	0,382181
HPGe3	HPGe1	795	605	6	10,5	$7{,}66753 \cdot 10^{-5}$	0,853	0,348426
HPGe3	HPGe2	605	795	7	11,9	$5{,}61757 \cdot 10^{-5}$	0,853	0,538983
HPGe3	HPGe2	795	605	4	7,8	$5{,}10791 \cdot 10^{-5}$	0,853	0,388533
HPGe3	HPGe4	605	795	9	14,5	$1{,}27868 \cdot 10^{-4}$	0,853	0,288525
HPGe3	HPGe4	795	605	4	7,8	$1{,}18750 \cdot 10^{-4}$	0,853	0,167123
HPGe3	HPGe5	605	795	2	3	$2{,}76914 \cdot 10^{-5}$	0,853	0,275647
HPGe3	HPGe5	795	605	7	11,9	$2{,}51431 \cdot 10^{-5}$	0,853	1,204215
HPGe4	HPGe1	605	795	10	15,8	$6{,}72183 \cdot 10^{-5}$	0,853	0,598062
HPGe4	HPGe1	795	605	4	7,8	$7{,}33342 \cdot 10^{-5}$	0,853	0,270623
HPGe4	HPGe2	605	795	7	11,9	$4{,}97200 \cdot 10^{-5}$	0,853	0,608965
HPGe4	HPGe2	795	605	4	7,8	$5{,}23816 \cdot 10^{-5}$	0,853	0,378872
HPGe4	HPGe3	605	795	4	7,8	$1{,}21752 \cdot 10^{-4}$	0,853	0,163003
HPGe4	HPGe3	795	605	7	11,9	$1{,}26225 \cdot 10^{-4}$	0,853	0,239871
HPGe4	HPGe5	605	795	2	3	$2{,}82577 \cdot 10^{-5}$	0,853	0,270123
HPGe4	HPGe5	795	605	9	14,5	$2{,}41805 \cdot 10^{-5}$	0,853	1,525739
HPGe5	HPGe1	605	795	2	3	$1{,}46668 \cdot 10^{-5}$	0,853	0,520429
HPGe5	HPGe1	795	605	2	3	$1{,}46102 \cdot 10^{-5}$	0,853	0,522446
HPGe5	HPGe2	605	795	4	7,8	$1{,}01932 \cdot 10^{-5}$	0,853	1,946983
HPGe5	HPGe2	795	605	2	3	$1{,}18920 \cdot 10^{-5}$	0,853	0,641863
HPGe5	HPGe3	605	795	4	7,8	$2{,}56528 \cdot 10^{-5}$	0,853	0,773636
HPGe5	HPGe3	795	605	2	3	$2{,}54263 \cdot 10^{-5}$	0,853	0,300203
HPGe5	HPGe4	605	795	6	10,5	$2{,}44636 \cdot 10^{-5}$	0,853	1,092058
HPGe5	HPGe4	795	605	2	3	$2{,}63890 \cdot 10^{-5}$	0,853	0,289251

4.2 Del 2

Energikalibreringen av provet innehållandes Co-60 resulterade i en linjär relation mellan energi och kanal för alla detektorer. Se figur 3 för energikalibreringen för detektor 1. Tabell 5 visar parametrarna som erhölls för de fem olika energikalibreringarna. Vid undersökningen av relationen mellan energi och FWHM togs beslutet att en linjär anpassning var det bästa alternativet då en mer komplicerad funktion såg ut att leda till overfitting. Se figur 4 för FWHM-kalibreringen för detektor 2. I tabell 6 syns parametrarna för de linjära sambanden mellan energi och FWHM för de fem detektorerna .

Tabell 5: Parametrar för energikalibreringen för kalibreringsprovet innehållandes Co-60.

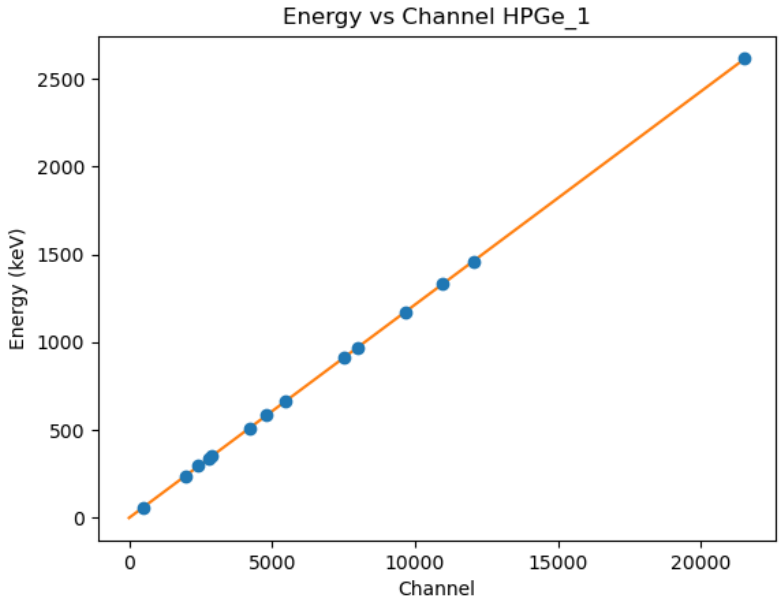
Detektor	k (keV/kanal)	m (keV)
1	8,23894	-0,373967
2	7,87621	4,10637
3	5,52373	-0,233677
4	5,57319	-0,303066
5	9,53127	-0,899606

Tabell 6: Paramterar för kalibreringen av FWHM för kalibreringsprovet innehållandes Co-60.

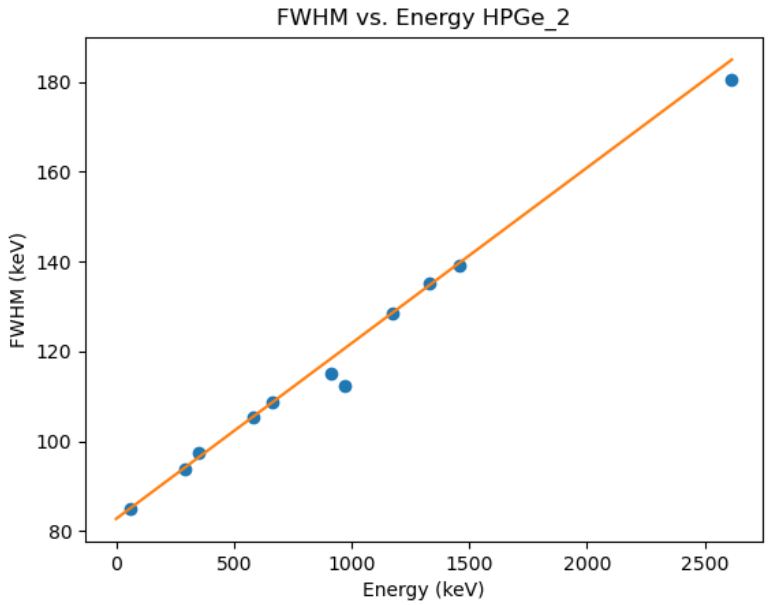
Detektor	k (keV/keV)	m (keV)
1	0,0463568	80,8522
2	0,0390986	82,7099
3	0,0167487	46,0724
4	0,0464420	38,2816
5	0,000511224	193,904

Gällande effektivitetskalibreringen kunde ingen kurvanpassning göras på de fyra energier för vilka aktiviteten var känd, se figur 5 för en plot av effektiviteten för de olika energierna för detektor 3. Effektiviteterna för de fyra energierna för varje detektor listas också i tabell 7.

När koincidenser mellan sönderfall med energierna 1173 och 1332 keV i Co-60 betraktades kunde koincidenseffektiviteter för de energierna beräknas. Dessa jämfördes med produkten av de enskilda effektiviteterna och korrektionstermen togs fram. Resultatet av dessa mätningar och beräkningar återfinns i tabell 8. Ett histogram över de koincidenta händelserna i detektorerna 3 och 4 syns i figur 6 och en inzoomning i det område där flest koincidenta händelser sker syns i figur 7. I den inzoomade figuren är de koincidenta energierna 1173 och 1332 keV från Co-60 synliga. Det går också att se diagonala linjer från Comptonspridning mellan de två detektorerna.



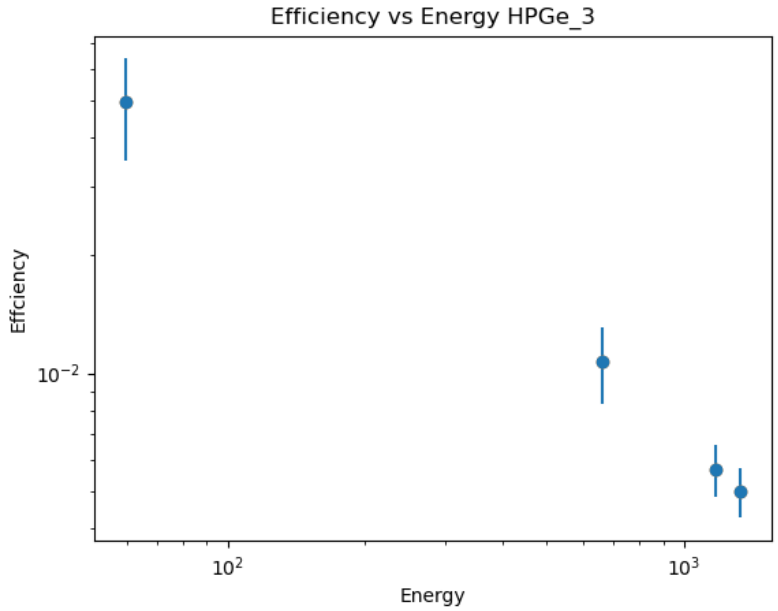
Figur 3: Energikalibreringen för HPGe1 i orange linje och alla punkter för vilka energi och kanal är kända i blått.



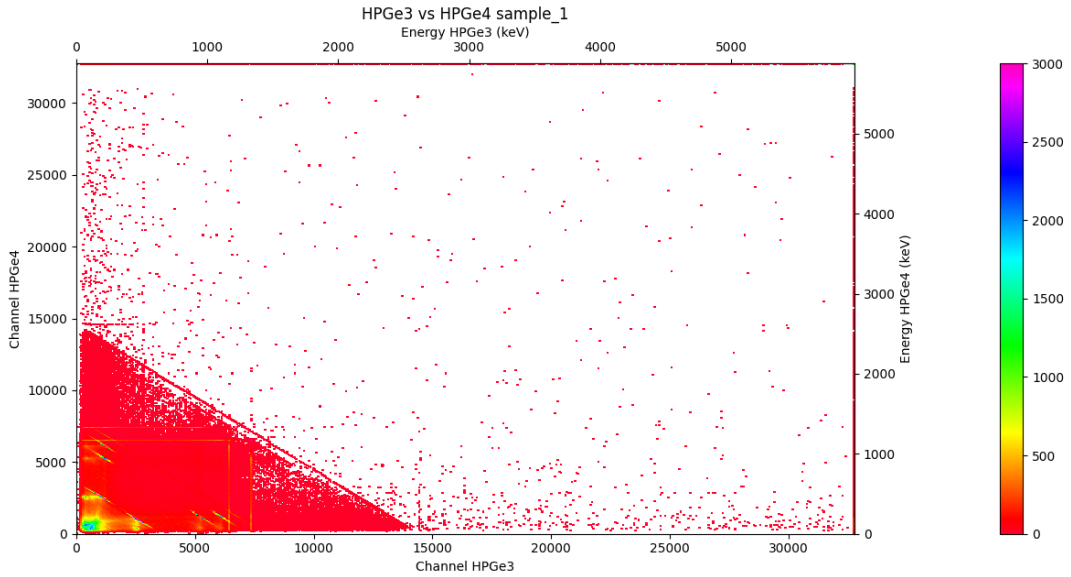
Figur 4: Kalibreringen av FWHM för HPGe2, den anpassade linjen i orange och mätpunkterna med känd energi och FWHM i blått.

Tabell 7: Effektiviteterna för de olika energierna i de olika detektorerna för singelspektra.

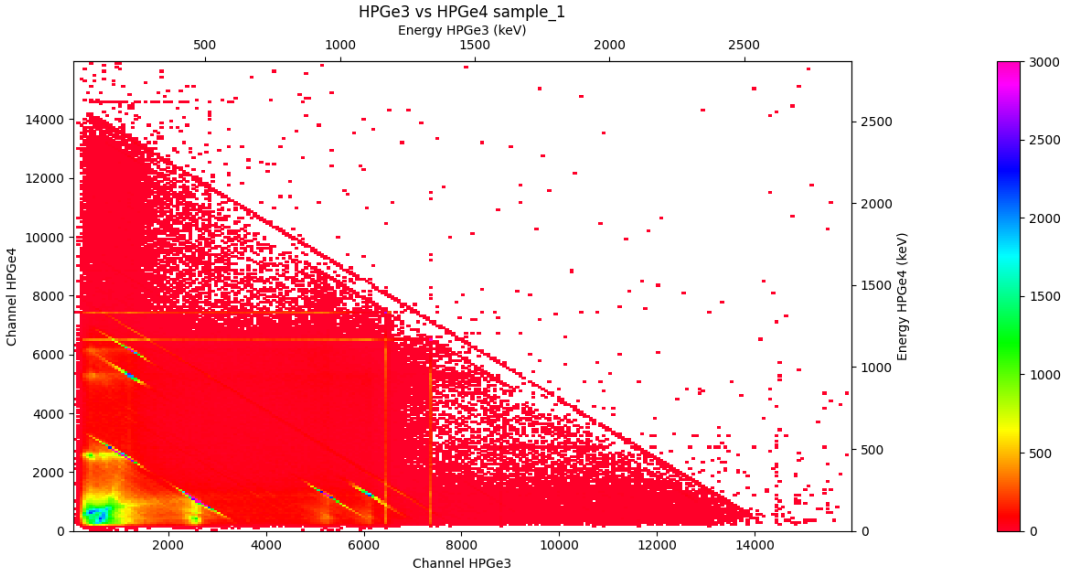
Detektor	Energi (keV)	Effektivitet
1	59,5409	0,00631293
1	661,657	0,00624623
1	1173,228	0,00359313
1	1332,492	0,00320328
2	59,5409	7818,61
2	661,657	0,00439212
2	1173,228	0,00242174
2	1332,492	0,00213604
3	59,5409	0,0493920
3	661,657	0,0107457
3	1173,228	0,00568636
3	1332,492	0,00499356
4	59,5409	0,0546045
4	661,657	0,0103488
4	1173,228	0,00553633
4	1332,492	0,00486869
5	59,5409	0,00226859
5	661,657	0,00220766
5	1173,228	0,00155062
5	1332,492	0,00142836



Figur 5: Singeleffektiviteterna för HPGe3, logaritmisk skala.



Figur 6: De koincidenta händelsernas energi i HPGe3 och HPGe4



Figur 7: De koincidenta händelsernas energi i HPGe3 och HPGe4, inzoomat på det område där de flesta koincidenta händelserna mättes.

Tabell 8: Koincidenseffektiviteter för energierna 1173 och 1332 keV för Co-60.

Detector A	Detector B	Energy A (keV)	Energy B (keV)	Peak-peak counts	Background counts	Coincidence efficiency	Efficiency product ($\varepsilon_A \cdot \varepsilon_B$)	Correction ρ
HPGe1	HPGe2	1173	1332	588	2	$6{,}71166 \cdot 10^{-6}$	$7{,}67505 \cdot 10^{-6}$	0,874477
HPGe1	HPGe2	1332	1173	620	3	$7{,}07692 \cdot 10^{-6}$	$7{,}75752 \cdot 10^{-6}$	0,912265
HPGe1	HPGe3	1173	1332	1915	2	$2{,}18585 \cdot 10^{-5}$	$1{,}79425 \cdot 10^{-5}$	1,21826
HPGe1	HPGe3	1332	1173	1896	2	$2{,}16417 \cdot 10^{-5}$	$1{,}8215 \cdot 10^{-5}$	1,18812
HPGe1	HPGe4	1173	1332	1811	1	$2{,}06714 \cdot 10^{-5}$	$1{,}74938 \cdot 10^{-5}$	1,18164
HPGe1	HPGe4	1332	1173	1819	4	$2{,}07628 \cdot 10^{-5}$	$1{,}77344 \cdot 10^{-5}$	1,17076
HPGe1	HPGe5	1173	1332	457	0	$5{,}21637 \cdot 10^{-6}$	$5{,}13228 \cdot 10^{-6}$	1,01639
HPGe1	HPGe5	1332	1173	474	1	$5{,}41042 \cdot 10^{-6}$	$4{,}96706 \cdot 10^{-6}$	1,08926
HPGe2	HPGe1	1173	1332	622	1	$7{,}09975 \cdot 10^{-6}$	$7{,}75752 \cdot 10^{-6}$	0,915208
HPGe2	HPGe1	1332	1173	593	0	$6{,}76873 \cdot 10^{-6}$	$7{,}67505 \cdot 10^{-6}$	0,881913
HPGe2	HPGe3	1173	1332	1180	1	$1{,}3469 \cdot 10^{-5}$	$1{,}20931 \cdot 10^{-5}$	1,11377
HPGe2	HPGe3	1332	1173	1231	1	$1{,}40511 \cdot 10^{-5}$	$1{,}21463 \cdot 10^{-5}$	1,15682
HPGe2	HPGe4	1173	1332	1269	4	$1{,}44849 \cdot 10^{-5}$	$1{,}17907 \cdot 10^{-5}$	1,22850
HPGe2	HPGe4	1332	1173	1186	5	$1{,}35375 \cdot 10^{-5}$	$1{,}18258 \cdot 10^{-5}$	1,14474
HPGe2	HPGe5	1173	1332	303	2	$3{,}45856 \cdot 10^{-6}$	$3{,}45912 \cdot 10^{-6}$	0,999838
HPGe2	HPGe5	1332	1173	306	0	$3{,}4928 \cdot 10^{-6}$	$3{,}31217 \cdot 10^{-6}$	1,05454
HPGe3	HPGe1	1173	1332	1894	5	$2{,}16188 \cdot 10^{-5}$	$1{,}8215 \cdot 10^{-5}$	1,18687
HPGe3	HPGe1	1332	1173	1920	3	$2{,}19156 \cdot 10^{-5}$	$1{,}79425 \cdot 10^{-5}$	1,22144
HPGe3	HPGe2	1173	1332	1226	6	$1{,}3994 \cdot 10^{-5}$	$1{,}21463 \cdot 10^{-5}$	1,15213
HPGe3	HPGe2	1332	1173	1178	4	$1{,}34461 \cdot 10^{-5}$	$1{,}20931 \cdot 10^{-5}$	1,11188
HPGe3	HPGe4	1173	1332	2941	4	$3{,}35697 \cdot 10^{-5}$	$2{,}76851 \cdot 10^{-5}$	1,21255
HPGe3	HPGe4	1332	1173	3102	8	$3{,}54074 \cdot 10^{-5}$	$2{,}7646 \cdot 10^{-5}$	1,28074
HPGe3	HPGe5	1173	1332	777	0	$8{,}86898 \cdot 10^{-6}$	$8{,}12217 \cdot 10^{-6}$	1,09195
HPGe3	HPGe5	1332	1173	745	1	$8{,}50371 \cdot 10^{-6}$	$7{,}74309 \cdot 10^{-6}$	1,09823
HPGe4	HPGe1	1173	1332	1813	5	$2{,}06943 \cdot 10^{-5}$	$1{,}77344 \cdot 10^{-5}$	1,16690
HPGe4	HPGe1	1332	1173	1806	5	$2{,}06144 \cdot 10^{-5}$	$1{,}74938 \cdot 10^{-5}$	1,17838
HPGe4	HPGe2	1173	1332	1189	3	$1{,}35717 \cdot 10^{-5}$	$1{,}18258 \cdot 10^{-5}$	1,14763
HPGe4	HPGe2	1332	1173	1266	7	$1{,}44506 \cdot 10^{-5}$	$1{,}17907 \cdot 10^{-5}$	1,22559
HPGe4	HPGe3	1173	1332	3091	11	$3{,}52819 \cdot 10^{-5}$	$2{,}7646 \cdot 10^{-5}$	1,27620
HPGe4	HPGe3	1332	1173	2928	6	$3{,}34213 \cdot 10^{-5}$	$2{,}76851 \cdot 10^{-5}$	1,20719
HPGe4	HPGe5	1173	1332	786	4	$8{,}9717 \cdot 10^{-6}$	$7{,}90787 \cdot 10^{-6}$	1,13453
HPGe4	HPGe5	1332	1173	785	2	$8{,}96029 \cdot 10^{-6}$	$7{,}54946 \cdot 10^{-6}$	1,18688
HPGe5	HPGe1	1173	1332	471	1	$5{,}37617 \cdot 10^{-6}$	$4{,}96706 \cdot 10^{-6}$	1,08237
HPGe5	HPGe1	1332	1173	460	1	$5{,}25062 \cdot 10^{-6}$	$5{,}13228 \cdot 10^{-6}$	1,02306
HPGe5	HPGe2	1173	1332	302	2	$3{,}44714 \cdot 10^{-6}$	$3{,}31217 \cdot 10^{-6}$	1,04075
HPGe5	HPGe2	1332	1173	297	4	$3{,}39007 \cdot 10^{-6}$	$3{,}45912 \cdot 10^{-6}$	0,980039
HPGe5	HPGe3	1173	1332	742	3	$8{,}46947 \cdot 10^{-6}$	$7{,}74309 \cdot 10^{-6}$	1,09381
HPGe5	HPGe3	1332	1173	774	2	$8{,}83473 \cdot 10^{-6}$	$8{,}12217 \cdot 10^{-6}$	1,08773
HPGe5	HPGe4	1173	1332	787	4	$8{,}98312 \cdot 10^{-6}$	$7{,}54946 \cdot 10^{-6}$	1,18990
HPGe5	HPGe4	1332	1173	788	2	$8{,}99453 \cdot 10^{-6}$	$7{,}90787 \cdot 10^{-6}$	1,13742

I tabell 9 finns den kritiska gränsen, L_C, detektionsgränsen L_D och minsta mätbara aktivitet, MDA, samlade. I tabellen gäller gränserna för singelspektran för de olika detektorerna. Gränserna för koincidensspektra, projicerat på detektor A utan gating återfinns i tabell 10. För koincidensspektra som projiceras ner på detektor A efter gating syns gränserna i tabell 11. Ur tabellerna som visar gränserna för olika fall kan här observeras att MDA sjunker när koincidens betraktas utan gating. För koincidens med gating ser det ut att öka igen för de flesta detektorpar. Det är dock svårt att dra slutsatser när det kommer till de fall där den kritiska gränsen är 2 eftersom det är ett resultat av approximationen $0 \approx 0,1$ för att kunna utföra de beräkningar som beskrivits i avsnitt 3.1.

Tabell 9: L_C, L_D och MDA för singelspektra för alla detektorer. Inkluderar de parametrar som används för beräkningar.

Detektor	Energy (keV)	Critical limit (counts)	Detection limit (counts)	Efficiency	Intensity (%)	MDA (Bq)
HPGe1	1173	516,078	1032,65	0,00359313	99,85	0,624681
HPGe1	1332	379,447	759,975	0,00320328	99,9826	0,514998
HPGe2	1173	420,053	841,014	0,00242174	99,85	0,754836
HPGe2	1332	297,794	597,019	0,00213604	99,9826	0,606710
HPGe3	1173	452,428	905,625	0,00568636	99,85	0,346172
HPGe3	1332	301,075	603,568	0,00499356	99,9826	0,262372
HPGe4	1173	436,239	873,316	0,00553633	99,85	0,342868
HPGe4	1332	314,610	630,581	0,00486869	99,9826	0,281145
HPGe5	1173	555,889	1112,10	0,00155062	99,85	1,55890
HPGe5	1332	425,817	852,516	0,00142836	99,9826	1,29559

5 Diskussion om felkällor och metodik

Det finns många åsikter om vart gränsen går för när Poissonfördelningen kan approximeras som en normalfördelning. I det här projektet valdes gränsen 25 counts efter vad som angetts i *Gamma-Ray Spectrometry* [1]. Valet av den här gränsen kan spela en betydande roll i den resulterande kritiska gränsen. Som kan ses i tabell 11, specifikt i koincidenserna mellan HPGe2 och HPGe5 projicerat på HPGe2, fanns det ett tillfälle där det i fallet med icke-gatead koincidens fanns färre än 25 counts och den kritiska gränsen med Poissonstatistik bestämdes till 30. På raden ovanför var antalet counts fler och normalfördelningsapproximationen gjordes vilket ledde till 14,4 som kritisk gräns. Detta trots att den kritiska gränsen ska vara högre för ett större antal counts i bakgrunden. Valet av gräns för normalapproximation har alltså stor påverkan på den kritiska gränsen och detektionsgränsen och därmed också på MDA. Med det sagt är tabellerna 11 och 4 inte helt pålitliga eftersom ett relativt lågt antal counts där betraktades som normalfördelade.

Angående approximationen $0 \approx 0,1$ så kan dess lämplighet ifrågasättas men resultatet att den kritiska gränsen blir 2 kan ändå anses rimligt. Ett annat problem relaterat till de fall med litet antal counts är att den kritiska gränsen måste vara ett heltal och att det återkommande leder till att summan i ekvation 8 är betydligt mindre än α eftersom heltalet innan ger en summa som är lite högre än α. Den kritiska gränsen blir alltså högre än vad den hade varit om den fick vara ett decimaltal. Därmed blir också detektionsgränsen och MDA högre. Skillnaden blir ännu större för låga antal counts i bakgrunden eftersom den kritiska gränsen där är lägre.

6 Slutsatser

En viktig iaktagelse i tabell 1 är att detektionseffektiviteten i koincidens avviker signifikant från produkten av de enskilda effektiviteterna i detektorelementen. Detta är inte överraskande då detta kan ha flera möjliga orsaker såsom vinkelkorrelation i gammaemission, källans utbredning i rummet (ej ideal punktkälla), eller effekter av true-coincidence summing. Dock är det viktigt att ha en observation av avvikelsens storlek, och tabell 1 visar att avvikelsen mellan koincedenseffektivitet och produkten av elementens detektionseffektivitet

kan vara nära en fjärdedel. Detta betyder att den måste beaktas i kvantitativ analys, men kanske kan försummas i preliminära designbaserade beräkningar för att bedöma görbarhet av ett instrument.

En intressant observation i jämförelse av tabell 9 och 10, är att känsligheten i form av MDA inte konsekvent är bättre för koincidenser än för singlegamma. Det är med andra ord fullt möjligt att designa en mycket dålig koincidensspektrometer, som inte uppnår förbättrad känslighet. Ett mönster uppenbarar sig dock att de två bästa elementen (med bästa individuella MDA), HPGe3 och HPGe4, samverkar mycket väl i koincidensspektrumet, och koincidensdetektion med dessa två element uppvisar den bästa registrerade MDA, för samtliga undersökta fall. Det är med andra ord även möjligt att konstruera en koincidensspektrometer som väl uppfyller sitt syfte. En slutsats är att noggrann förberedelse genom adekvat design och optimering av dylika detektorer är viktigt, och i synnerhet att hög toppeffektivitet i de enskilda elementen är essentiellt för att uppnå en optimal design. Denna insikt kommer att guida den forsatta utvecklingen av nästa generations gamma-koincidensspektrometer inom CoSpeR-projektet, som fortsätter med utveckling av simuleringsmetoder med Monte Carlo-metoden avsedda för bakgrunds- och effektivitetsimulering för koincidensdetektion, i syfte att göra optimeringsstudie av nästa detektoruppställning.

Tabell 10: L_C, L_D och MDA för projicerade koincidensspektra för alla detektorpar och möjliga projektioner. Inkluderar också antalet counts i kalibreringsprovet för beräkningarna.

Detektor A	Detektor B	Energi (keV)	Critical limit	Detection limit	Counts calibration sample	MDA (Bq)
HPGe1	HPGe2	1173	37,0609	76,6728	6195	0,221899
HPGe1	HPGe2	1332	26,8709	56,3364	5766	0,175174
HPGe1	HPGe3	1173	68,1301	138,678	15839	0,156977
HPGe1	HPGe3	1332	48,2034	98,9099	14534	0,122014
HPGe1	HPGe4	1173	68,7646	139,944	14844	0,169029
HPGe1	HPGe4	1332	46,9482	96,4049	13741	0,125787
HPGe1	HPGe5	1173	15,1001	32,8454	3304	0,178234
HPGe1	HPGe5	1332	11,8807	26,4204	3028	0,156437
HPGe2	HPGe1	1173	37,1341	76,8188	5071	0,271600
HPGe2	HPGe1	1332	24,8776	52,3584	4617	0,203321
HPGe2	HPGe3	1173	62,8236	128,088	10656	0,215511
HPGe2	HPGe3	1332	41,6151	85,7617	9763	0,157495
HPGe2	HPGe4	1173	61,0264	124,501	10136	0,220223
HPGe2	HPGe4	1332	43,9006	90,3227	9165	0,176693
HPGe2	HPGe5	1173	14,3631	31,3745	2202	0,255456
HPGe2	HPGe5	1332	30	40	2017	0,355558
HPGe3	HPGe1	1173	70,7108	143,828	14866	0,173462
HPGe3	HPGe1	1332	44,8184	92,1545	13221	0,124971
HPGe3	HPGe2	1173	63,9372	130,310	11751	0,198819
HPGe3	HPGe2	1332	39,8151	82,1692	10906	0,135083
HPGe3	HPGe4	1173	63,4257	129,289	23754	0,0975845
HPGe3	HPGe4	1332	43,5903	89,7035	22126	0,0726879
HPGe3	HPGe5	1173	25,9458	54,4902	5352	0,182540
HPGe3	HPGe5	1332	18,0481	38,7287	4743	0,146398
HPGe4	HPGe1	1173	66,2310	134,888	14193	0,170394
HPGe4	HPGe1	1332	42,0692	86,6679	12970	0,119805
HPGe4	HPGe2	1173	59,1288	120,714	11358	0,190551
HPGe4	HPGe2	1332	39,8151	82,1692	10545	0,139707
HPGe4	HPGe3	1173	59,5405	121,535	25386	0,0858350
HPGe4	HPGe3	1332	40,7584	84,0518	22612	0,0666444
HPGe4	HPGe5	1173	21,6075	45,8323	5234	0,156998
HPGe4	HPGe5	1332	17,1219	36,8804	4776	0,138448
HPGe5	HPGe1	1173	19,4942	41,6147	3811	0,195778
HPGe5	HPGe1	1332	17,5911	37,8167	3469	0,195450
HPGe5	HPGe2	1173	19,9075	42,4396	3127	0,243332
HPGe5	HPGe2	1332	15,4555	33,5546	2887	0,208382
HPGe5	HPGe3	1173	27,9600	58,5100	6545	0,160279
HPGe5	HPGe3	1332	18,0481	38,7287	6106	0,113719
HPGe5	HPGe4	1173	27,2720	57,1369	6427	0,159391
HPGe5	HPGe4	1332	20,7095	44,0401	6045	0,130619

Tabell 11: L_C, L_D och MDA för projicerade koincidensspektra med gating för alla detektorpar och möjliga projektioner. Inkluderar också de parametrar som användes vid beräkningen av MDA.

Detector A	Detector B	Energy A	Energy B	Critical limit	Detection limit	Efficiency	Intensity	MDA (Bq)
HPGe1	HPGe2	1173	1332	2	3	$6{,}71166 \cdot 10^{-6}$	0,998	0,972046
HPGe1	HPGe2	1332	1173	4	7,8	$7{,}07692 \cdot 10^{-6}$	0,998	2,39688
HPGe1	HPGe3	1173	1332	2	3	$2{,}18585 \cdot 10^{-5}$	0,998	0,298466
HPGe1	HPGe3	1332	1173	2	3	$2{,}16417 \cdot 10^{-5}$	0,998	0,301457
HPGe1	HPGe4	1173	1332	2	3	$2{,}06714 \cdot 10^{-5}$	0,998	0,315606
HPGe1	HPGe4	1332	1173	4	7,8	$2{,}07628 \cdot 10^{-5}$	0,998	0,816967
HPGe1	HPGe5	1173	1332	2	3	$5{,}21637 \cdot 10^{-6}$	0,998	1,25068
HPGe1	HPGe5	1332	1173	2	3	$5{,}41042 \cdot 10^{-6}$	0,998	1,20583
HPGe2	HPGe1	1173	1332	2	3	$7{,}09975 \cdot 10^{-6}$	0,998	0,918912
HPGe2	HPGe1	1332	1173	2	3	$6{,}76873 \cdot 10^{-6}$	0,998	0,963850
HPGe2	HPGe3	1173	1332	2	3	$1{,}34690 \cdot 10^{-5}$	0,998	0,484375
HPGe2	HPGe3	1332	1173	2	3	$1{,}40511 \cdot 10^{-5}$	0,998	0,464308
HPGe2	HPGe4	1173	1332	2	3	$1{,}44849 \cdot 10^{-5}$	0,998	0,450404
HPGe2	HPGe4	1332	1173	2	3	$1{,}35375 \cdot 10^{-5}$	0,998	0,481925
HPGe2	HPGe5	1173	1332	2	3	$3{,}45856 \cdot 10^{-6}$	0,998	1,88635
HPGe2	HPGe5	1332	1173	2	3	$3{,}49280 \cdot 10^{-6}$	0,998	1,86785
HPGe3	HPGe1	1173	1332	2	3	$2{,}16188 \cdot 10^{-5}$	0,998	0,301776
HPGe3	HPGe1	1332	1173	2	3	$2{,}19156 \cdot 10^{-5}$	0,998	0,297689
HPGe3	HPGe2	1173	1332	2	3	$1{,}39940 \cdot 10^{-5}$	0,998	0,466201
HPGe3	HPGe2	1332	1173	2	3	$1{,}34461 \cdot 10^{-5}$	0,998	0,485198
HPGe3	HPGe4	1173	1332	2	3	$3{,}35697 \cdot 10^{-5}$	0,998	0,194343
HPGe3	HPGe4	1332	1173	2	3	$3{,}54074 \cdot 10^{-5}$	0,998	0,184256
HPGe3	HPGe5	1173	1332	2	3	$8{,}86898 \cdot 10^{-6}$	0,998	0,735602
HPGe3	HPGe5	1332	1173	2	3	$8{,}50371 \cdot 10^{-6}$	0,998	0,767199
HPGe4	HPGe1	1173	1332	4	7,8	$2{,}06943 \cdot 10^{-5}$	0,998	0,819671
HPGe4	HPGe1	1332	1173	2	3	$2{,}06144 \cdot 10^{-5}$	0,998	0,316480
HPGe4	HPGe2	1173	1332	2	3	$1{,}35717 \cdot 10^{-5}$	0,998	0,480709
HPGe4	HPGe2	1332	1173	2	3	$1{,}44506 \cdot 10^{-5}$	0,998	0,451472
HPGe4	HPGe3	1173	1332	2	3	$3{,}52819 \cdot 10^{-5}$	0,998	0,184912
HPGe4	HPGe3	1332	1173	2	3	$3{,}34213 \cdot 10^{-5}$	0,998	0,195206
HPGe4	HPGe5	1173	1332	2	3	$8{,}97170 \cdot 10^{-6}$	0,998	0,727179
HPGe4	HPGe5	1332	1173	2	3	$8{,}96029 \cdot 10^{-6}$	0,998	0,728106
HPGe5	HPGe1	1173	1332	2	3	$5{,}37617 \cdot 10^{-6}$	0,998	1,21351
HPGe5	HPGe1	1332	1173	2	3	$5{,}25062 \cdot 10^{-6}$	0,998	1,24253
HPGe5	HPGe2	1173	1332	2	3	$3{,}44714 \cdot 10^{-6}$	0,998	1,89259
HPGe5	HPGe2	1332	1173	2	3	$3{,}39007 \cdot 10^{-6}$	0,998	1,92445
HPGe5	HPGe3	1173	1332	2	3	$8{,}46947 \cdot 10^{-6}$	0,998	0,770301
HPGe5	HPGe3	1332	1173	2	3	$8{,}83473 \cdot 10^{-6}$	0,998	0,738453
HPGe5	HPGe4	1173	1332	2	3	$8{,}98312 \cdot 10^{-6}$	0,998	0,726255
HPGe5	HPGe4	1332	1173	2	3	$8{,}99453 \cdot 10^{-6}$	0,998	0,725334

Referenser

[1] Gordon Gilmore. *Practical gamma-ray spectrometry*. eng. 2nd ed. Chichester, England ; John Wiley & Sons, Ltd, 2008. Kap. 5. ISBN: 9780470861967.

[2] Alf Göök m. fl. "Timestamped list-mode data from coincidence γ-ray spectrometry with HPGe detectors on air-filter samples". I: *Data in Brief* 61 (2025), s. 111832. ISSN: 2352-3409. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dib.2025.111832. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352340925005591.

[3] Ellen Ivarsson Biebel och Rasmus Wallentin. "Calibration of Coincidence Gamma Spectrometry Detector GeCo". Examensarb. Uppsala University, 2024. URL: https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:uu:diva-533142.