



UPPSALA
UNIVERSITET

Department of Radiation Sciences
UPPSALA UNIVERSITY

Box 535, SE-75121 Uppsala, Sweden

Internal report

ISV-1/2002
Maj 2002

Utredning inför omkonstruktion av Pluto - en utrustning för gammatomografi av använt kärnbränsle

Johan Kilander

Institutionen för strålningsvetenskap, Uppsala universitet, Box 535,
SE-751 21 Uppsala, Sweden

Sammanfattning: Effektivisering av driften i en kärnreaktor kräver god kunskap om bränsleparametrar som effekt och utbränning i varje punkt i härden. Sådana parametrar kan erhållas genom att mäta strålfältet från bränslet. För att kunna bestämma strålfältet från varje enskild bränslestav utan att demontera ett helt bränsleelement håller man på Uppsala Universitet sedan 1996 på att konstruera ett mätverktyg som genom en tomografisk metod kan härleda strålningen från ett element till enskilda stavar. Vid en prototyp av detta mätverktyg, kallat Pluto, har man haft problem med för hög räknehastighet och otillräcklig rörlighet på själva mätanordningen.

I syfte att sänka räknehastigheten avser man att bättre skydda detektorerna från oönskad strålning samt minska ner den öppna strålgången in till detektorerna. För att kunna montera bort det temporära strålskydd som hämmat mätanordningens rörlighet måste strålskyddet tillgodoses på annat sätt. Mot denna bakgrund har fem specificerade systemförändringar arbetats fram. Utifrån systemförändringarna har sedan ett antal konstruktionslösningar föreslagits. Genom simulering i datorprogram har de strålningsfysikaliska följderna av dessa lösningar utvärderats. Dessa utvärderingar har legat till grund för valda konstruktionslösningar vilka sedan utarbetats vidare i samarbete med två konstruktionsfirmor.

Johan Kilander
S:t Johannesgatan 30 c
SE-752 33 Uppsala
018 – 46 44 45
johan_kilander@hotmail.com

Handledare:
Ane Håkansson
Uppsala Universitet, ISV
Box 535, SE-751 21 Uppsala
Sweden

Abstract: As part of an on-going project that aims to develop a technique for tomographic studies of irradiated nuclear fuel, this paper presents an investigation of some design parameters of the tomographic device PLUTO.

The Monte Carlo code MCNP has been used for optimising the performance of PLUTO's detector system. The very high gamma-ray flux of irradiated nuclear fuel, shortly after shutdown, necessitates special attention regarding adequate radiation shielding and collimation in order to obtain a feasible counting rate in the detectors. Special lead filters have also been designed in order to increase the relative flux of high-energy gamma rays. The results of the calculations have been used as a base for mechanical construction and an outline of suitable equipment is suggested.

Innehållsförteckning

FÖRORD	4
1 INLEDNING	4
1.1 KÄRNKRAFT OCH KÄRNBRÄNSLE	4
1.2 PLUTO – EN UTRUSTNING FÖR TOMOGRAFI AV KÄRNBRÄNSLE	4
2 SYFTET MED DETTA ARBETE	8
3 METOD	10
3.1 MCNP (MONTE CARLO N-PARTICLE)	10
3.2 SIMULERADE SPEKTRA	11
4 TILLVÄGAGÅNGSSÄTT	13
4.1 BLYFILTERLÄNGD	14
4.2 BLYFILTERPLACERING	15
4.3 SPALTBREDD & SPALTHÖJD	16
4.4 ÖVERHÖRNING	17
5 RESULTAT	18
5.1 BLYFILTERLÄNGD	18
5.2 BLYFILTERPLACERING	19
5.3 SPALTBREDD & SPALTHÖJD	21
5.4 ÖVERHÖRNING	21
6 MEKANISK KONSTRUKTION	23
6.1 DETEKTORKAPSELN	23
6.2 SPALTUTFORMNING	24
6.3 PLUGGUTFORMNING.....	24
7 REFERENSER	25
APPENDIX A Teoretiska beräkningar av förväntade räknehastigheter	
APPENDIX B Konstruktionsritningar	

Förord

Det arbete jag här presenterar är ett 20 poängs examensarbete för erhållande av magisterexamen från Uppsala universitet. Arbetet har utförts under hösten 2001 på Institutionen för strålningsvetenskap vid Uppsala universitet.

Under våren 1999 gjorde jag ett examensarbete inom energiteknik i syfte att ta en maskiningenjörsexamen. Därefter har jag emellertid läst vidare och ämnar nu ta en magisterexamen samtidigt som jag tänkt profilera mig mer mot kärnfysik och kärnkraft. Detta arbete utgör ett steg mot samtliga dessa mål då det behandlar ett antal kärnfysikaliska grunder inför en omkonstruktion av en mätutrustning för använt kärnbränsle. Samtidigt som arbetet i viss mån utgör en ny profil på min utbildning så anknuter det därför på ett bra sätt till min tidigare konstruktionsinriktning på maskiningenjörsprogrammet.

Arbetet har till stor del bestått av simuleringar med programmet MCNP men det har även innefattat en del klassisk konstruktion och kontakter med övriga konstruktörer.

Johan Kilander, Uppsala den 4 april 2002

1 Inledning

1.1 Kärnkraft och kärnbränsle

I Sverige finns idag tre tryckvatten- och åtta kokvattenreaktorer i drift. Varje reaktor drivs av en härd bestående av 400-700 bränsleelement, även kallade bränslepatroner. Ett bränsleelement till en kokvattenreaktor har en storlek av ungefär $14 \times 14 \times 370$ cm. Vart och ett av dessa element innehåller ett knippe på 64 – 100 bränslestavar. Bränslestavarna är ca 370 cm långa och har en radie på ungefär 5 mm. Varje sommar utförs revision på verken, vilket bl.a. innebär att reaktortanken öppnas och inspekteras, vissa slitdelar byts ut samt ungefär en femtedel av bränslet ersätts med färskt bränsle. Eftersom olika positioner i härden ger varierande utbränning flyttas de kvarvarande bränsleelementen runt i härden efter ett schema bestämt utifrån härdberäkningar, så att utbränningen av bränslet ska bli så jämn som möjligt. Härdberäkningarna bygger på kärnfysikaliska modeller utifrån empiriska mätningar av neutronflödet i olika positioner i härden. Varje bränslepatron sitter alltså på olika positioner i härden i typiskt fem år innan bränslet är så utbränt att det inte längre är lönsamt att ha det kvar i härden.

1.2 PLUTO – en utrustning för tomografi av kärnbränsle

På institutionen för strålningsvetenskap vid Uppsala universitet har en forskargrupp sedan 1996 arbetat på ett projekt kallat Pluto. Pluto är ett verktyg för tomografisk mätning av använt kärnbränsle i syfte att studera effektfördelningen på stavnivå i detta. Denna kunskap kan användas vid härdberäkningar för att bättre kunna optimera härden vid t ex revision.

Långsiktigt kan metoden även ge ledning om ny konfiguration av bränslet med avseende på anrikning, brännbar absorptor, stavlängd och annat.

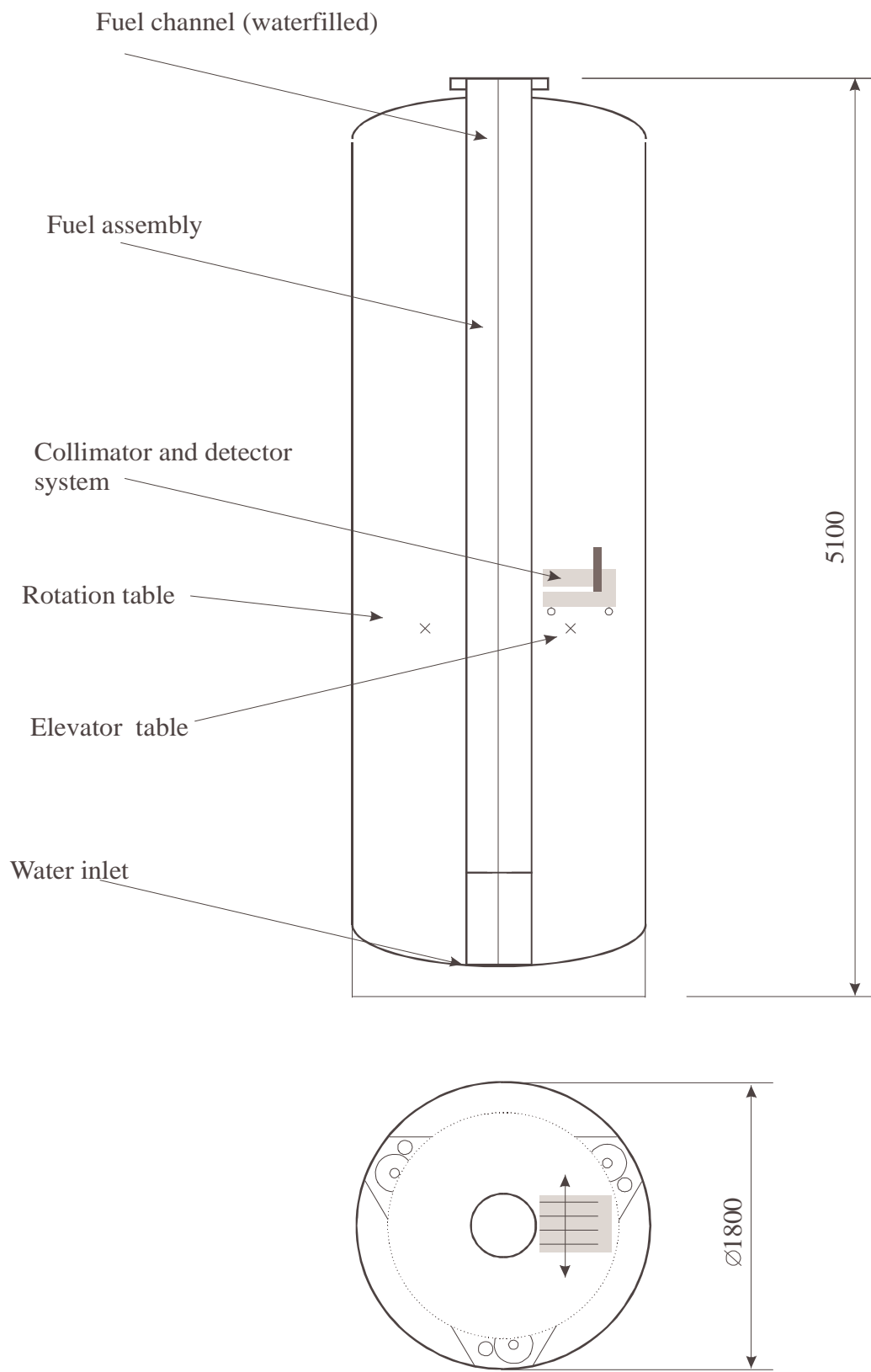
Sett i ett internationellt safeguardperspektiv kan Pluto även användas för att kontrollera att inget fissilt material kommit på avvägar t.ex. i syfte att tillverka kärnvapen.

För att mäta fördelningen av effektuttaget i enskilda bränslestavar har bränsleelementen tidigare demonterats varpå gammastrålningen från varje stav har uppmäts. Det är dock en besvärlig procedur som medför både risker och stora kostnader. Pluto samlar istället in data om strålfältet i en stor mängd punkter runt bränsleelementet, varvid effektfördelningen kan bestämmas med hjälp av tomografisk rekonstruktion utan att elementet behöver demonteras.

Med den tomografiska metoden kan 5-10 bränsleelement mätas under en tvåveckors mätperiod vilket kan jämföras med 10-15 bränslestavar med tidigare metoder.¹ En annan fördel är att bränslet kan återinstalleras i härden efter mätning, vilket inte skulle vara ekonomiskt försvarbart om bränslet en gång varit demonterat.

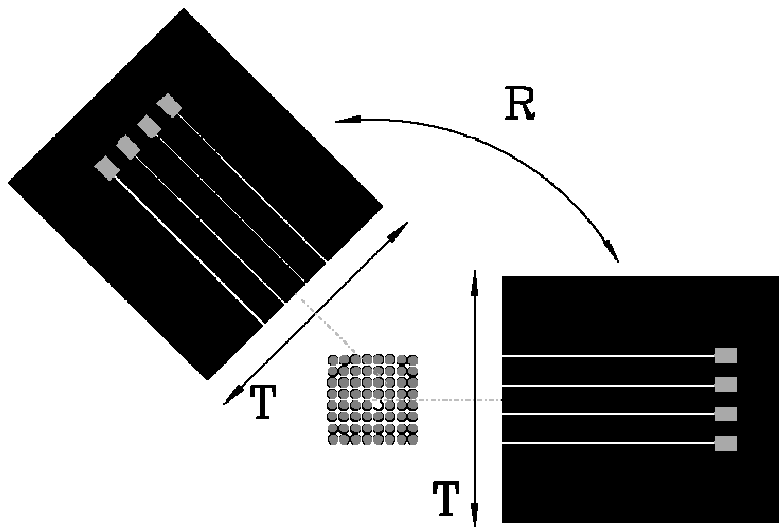
Pluto utgörs av en ballasterad tank som är ungefär fem meter hög och 1,8 m i diameter, se figur 1. Vid mätning placeras Pluto i en av kraftverkets bränslehanteringsbassänger. Därefter lyfts ett bränsleelement upp ur själva reaktorn och placeras inne i Plutos vattenfyllda innerrör, så att Pluto omsluter hela bränsleelementet. Mätanordningen finns placerad på ett bord inuti Pluto och kan placeras i valfri position kring bränslet genom axiella, laterala och azimutala förflyttningar. På så sätt kan strålningen från bränslet mätas på alla höjder och från alla horisontella vinklar inne i Pluto. Med hjälp av mätdata görs sedan tomografiska rekonstruktioner av hur olika radioaktiva isotoper fördelar sig på olika bränslestavar vid olika höjd i bränslet.

¹ Mätningarna kan påbörjas först sedan bränslet svalnat ett par veckor efter reaktoravställning, dessförinnan är bränslet alltför aktivt för att kunna hanteras och mätas upp. Med tiden förändras sedan bränslets strålningsbild vilket gör att mätningar bör ske senast ca. en månad efter reaktoravställning.

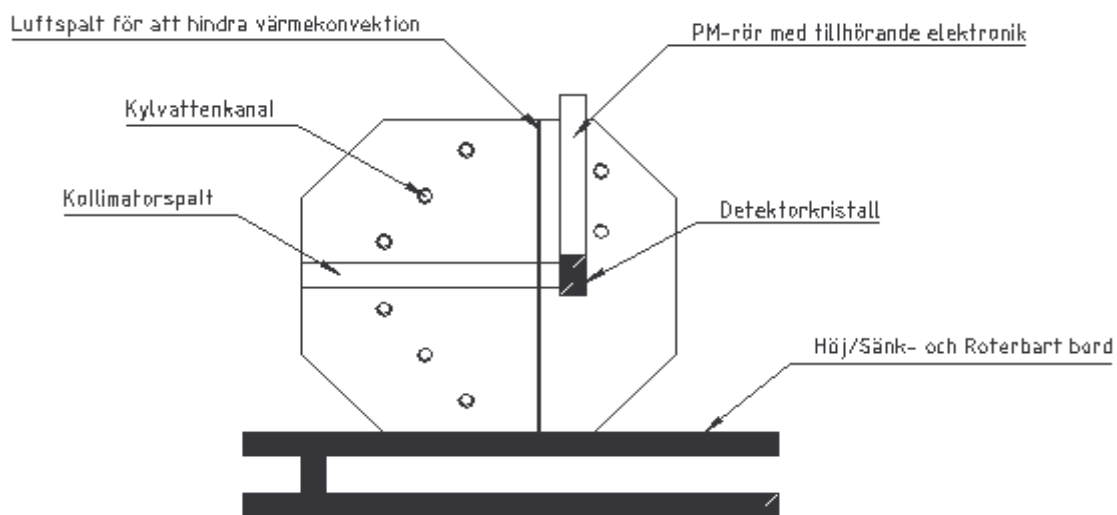


Figur 1.) Principskiss av Pluto

För att definiera den del av bränslet som bidrar till strålflödet i en viss mätposition och för att skärma bort bakgrundsstrålning används en kollimator. Kollimatoren är gjord av en wolframlegering för maximal strålskärning. Ytermåttarna är ca 30×40×50 cm och i den leder fyra kanaler in till varsin detektor. På så vis mäts strålflödet i fyra positioner parallellt för varje position på mätanordningen. De fyra öppna spalterna är idag tre mm breda och 30 mm höga och detektorerna är placerade 315 mm in i materialet från spaltöppningarna. Avståndet mellan bränslets centrum och detektorerna är 535 mm. Spalternas utformning gör att endast den strålning som emitterats mitt för spalten och strålar rakt in mot densamma kan nå in till detektorerna. Den volym av bränslet som genererar strålning till respektive detektor är på så sätt geometriskt väl definierad. Kollimatoren illustreras i figur 2 och 3.



Figur 2.) Kollimatoren med de fyra spalterna och detektorerna, sedd i genomskärning i två olika positioner. För att mäta upp bränslet från olika horisontella positioner kan kollimatoren förflyttas på de sätt figuren visar.



Figur 3. Plutos kollimator sedd i genomskärning från sidan. Bilden visar en horisontell spalt som leder in till detektorn, man ser även den kanal ovanför detektorn där PM-rör och kretskort sitter, denna kanal ska så långt det är möjligt förslutas till kommande konstruktion.

En första prototyp av Pluto stod färdig för provmätning hösten 2000. Första provmätningen genomfördes i december 2000 på Forsmark på ett bränsle som tagits ut under revisionen 2000 och därefter stått och svalnat i fem månader². Vid denna provmätning utsattes detektorerna för långt högre strålnivåer än de klarade av att hantera. Anledningen var att sekundärstrålning letat sig genom de i princip oskyddade s.k. PM-rörskanalerna ner till detektorerna, se fig. 3. Därför byggdes en blyskärmning som placerades ovanpå kollimatoren. Därefter gjordes i mars 2001 en ny mätning på samma bränsle, då med åtta månaders kyltid. Mätningen gick relativt bra, det framkom dock att räknehastigheten i detektorerna fortfarande var högre än väntat. För att kunna hantera bränslen med kyltider nedåt 14 dagar, vilka genererar betydligt högre räknehastigheter, har man därför sett sig tvungen att göra ytterligare omkonstruktioner av Pluto.

För att minska detektorernas räknehastighet användes vid proven i mars 2001 en dämpningsordning eller bländare i form av 30 mm attenuerande material framför spalterna. Bländaren minskade dock även spalternas geometriselektivitet genom att viss strålning efter växelverkan i bländaren kom att spridas in i spalten. För att undkomma denna effekt placeras lämpligen attenuerande material inne i spalten i stället vilket diskuteras i kapitel 2.

Den från bränslet emitterade strålningens intensitet och spektrala fördelning mäts i Pluto med hjälp av Vismutgermanatkristaller (BGO). Dessa är s.k. scintillatorer vilket innebär att en inkommande foton som deponerar sin energi i detektormaterialet ger upphov till ljusblixtar. Genom fotokatoden i ett fotomultiplikatorrör (PM-rör) omvandlas ljuset till elektroner, vilka i sin tur multipliceras i PM-röret för att ge upphov till en mätbar elektrisk signal. Eftersom ljusets intensitet är proportionell mot den infallande gammaenergin kan energin på inkommande gammakvanta bestämmas. Varje händelse registreras och adderas till ett register som motsvarar gammakvantens energi. På så sätt kan ett spektrum byggas upp.

Efter att bränslet mätts upp från de olika positionerna erhålls ett set av mätdata. Med hjälp av datorprogram bestäms sedan på tomografisk väg hur aktiviteten av olika isotoper fördelar sig mellan de olika bränslestavarna.

Av den strålning som bränslet avger extraheras intensiteten av den strålning som kan härledas till Barium -140 sönderfall. Skälet till att välja Ba-140 är att mängden Ba-140 är proportionell mot den termiska effekt som tagits ur ett bränsleelement den senaste tiden före reaktoravställning. Vidare dominerar Ba-140 sin del av gammaspektrumet vid den här aktuella kyltiden vilket tillsammans med den relativt höga gammaenergin om 1596 keV underlättar datainsamling och -analys.

2 Syftet med detta arbete

Ett syfte med omkonstruktionen av Pluto är att reducera det totala inkommande strålningsflödet till detektorerna. Härvid krävs ett optimeringsförfarande så att den lågenergetiska, inspridda, strålningen minimeras medan den intressanta 1596 keV strålningen bibehålls i så hög grad som möjligt.

² Det innebär att bränslet hade betydligt lägre aktivitet samt att den emitterade strålningen härrörde sig från delvis andra ämnen än de som dominerar ett bränsles strålningsemittering efter 14 dagars kyltid.

Ett annat syfte med arbetet är att öka mätanordningens vertikala rörlighet. Den tidigare nämnda temporära strålskärningen som byggdes ovanpå kollimatorpaketet, till skydd för inspridd strålning ovanifrån, hindrade den vertikala rörelsen av mätanordningen.

För att nå dessa två syften har arbetet delats upp i ett antal mer avgränsade systemförbättringar:

- * Ett sätt att minska räknehastigheten i detektorerna är att sätta in blyfilter i de öppna spalterna. Sådana blyfilter reducerar visserligen intensiteten av 1596 keV strålningen men filtrerar bort en relativt sett större andel av den lågenergetiska strålningen. Denna funktion är mycket värdefull då ca 90 % av den inkomna strålningen har energier under 1 000 keV. En uppgift har därför varit att bestämma den blymängd som är lämpligt att använda samt var i spalten blyfiltrena ska placeras.
- * Efter dimensionering och inplacering av dessa blyfilter är nästa fråga vilka spaltdimensioner som är optimala för att uppnå optimal räknehastighet i detektorerna. För att minska mängden inkommande gammastrålning måste spalterna göras smalare, men även spalthöjden är en intressant parameter i dessa sammanhang.
- * För att öka på mätanordningens vertikala rörlighet måste kollimatorns temporära blyskärmning monteras bort. Genom att använda kortare PM-rör kan nödvändig skärmning istället placeras i nuvarande PM-rörskanaler. En uppgift med detta arbete är därför att utforma en plugg att placera i PM-rörskanalerna. I denna plugg måste utrymme finnas för de högspännings- och signalkablar som ska anslutas till PM-röret.
- * Delvis som en följd av ovanstående punkt behövs nya detektorkrystaller och PM-rör. För att hålla dessa dikt an mot varandra för att säkerställa god optisk kontakt, samt för att hålla detektorn absolut skyddad från ljus, måste dessa kapslas in varpå kapseln placeras i kollimatorn. Utformningen av denna kapsel har varit en åtskild del av arbetet som inneburit lite mer av klassisk konstruktion och inte innefattat några datorberäkningar. Frågeställningen på detta område har främst gällt att göra kapseln så liten att den får plats mellan övriga detaljer i kollimatorn och att få kapseln ljustät samt att göra detta utan att försämra detektorernas mekaniska prestanda i övrigt. Samtidigt ska kapseln konstrueras på så sätt att kostnaderna för den, och för den bearbetning av övriga delar som krävs för att ge plats åt den, hålls så låga som möjligt.
- * Då de nya detektorkrystallerna är större än de förut använda och eftersom själva inkapslingen av kristallerna och de nya PM-rören kommer att kräva större utrymme så kommer mängden strålskärmande material mellan detektorerna att bli mindre än förut. Om det finns för lite skärmande material mellan detektorerna så kan sekundärstrålning från en detektor komma att spridas till närliggande detektorer och på så sätt bidra till oönskad bakgrundsstrålning i dessa, s.k. ”överhörning”. Det måste därför utredas vilken minsta mängd strålskärmande material som krävs mellan detektorerna – således hur stora detektorkapslarna kan tillåtas vara, samt vad den minskade mängden skärmande material kommer att ge för effekt på mätresultaten.

Detta arbete behandlar alltså fem olika frågeställningar rörande omkonstruktionen av Pluto. I fyra av dessa fall syftar omkonstruktionen mer eller mindre till att reglera den strålning som når in till detektorerna. Arbetet har alltså huvudsakligen gått ut på att genom datorsimuleringar utröna de strålningsfysikaliska följderna av olika förslag till konstruktionslösningar.

3 Metod

För att lösa de strålningsrelaterade problemen har ett datorprogram kallat MCNP använts. MCNP är ett Monte Carloprogram som simulerar emission och transport av partiklar. En stor del av arbetet bakom denna rapport har gått åt till inläsning och förståelse av detta program. Genom att indata i form av t ex olika geometrier och material har varierats så har de strålningsfysikaliska konsekvenserna av olika konstruktionslösningar för de tidigare nämnda problemen kunnat studeras.

3.1 MCNP (Monte Carlo N-Particle)

MCNP är ett Monte Carloprogram som utvecklats under flera decennier för att simulera den radioaktiva strålningens slumpvisa karaktär. Radioaktiv strålning emitteras stokastiskt; vilken kärna som ska sönderfalla näst och vilken riktning dess emitterade strålning ska ta är omöjligt att förutsäga. Däremot kan man använda statistiska överväganden för ett visst händelsemönster. MCNP är uppbyggt på en algoritm baserad på sådana överväganden och programmet simulerar hur de gammakvanta som sänds ut från ett bränsleelement växelverkar på sin väg genom olika geometrier och material.

I programmet matar man således in geometrier och material för systemets olika komponenter. Strålkällan definieras inklusive stråltyp och energifördelning. Dessutom finns möjlighet att ange om strålningen ska styras eller viktas på något bestämt sätt för att ge mer information om någon speciell del av geometrin. Som utdata ger programmet vilket strålningsflöde som passerar en given yta eller volym och/eller vilken energideponering som kommer att ske inom en given volym.

För simuleringarna har använts ett antal olika datorer med processorer på 200-1400 MHz. En sådan dator hinner simulera en strålningsemission på ungefär $10^5 - 10^7$ fotoner per timme med de olika geometrier som simulerats i detta arbete. Ett bränsleelement emitterar däremot i storleksordningen 10^{16} fotoner per sekund. Den räknehastighet som dagens datorer kan hantera utgör alltså bara en bråkdel av det strålningsflöde som emitteras från ett använt kärnbränsle. Detta gör att de resultat som lämnas i regel har dålig statistisk säkerhet, vilket i vissa fall kan innebära oacceptabelt stora felmarginaler. För att i möjligaste mån undkomma detta har programmet olika typer av variansreduktionsrutiner där man tex. kan styra strålningen eller vikta upp strålningen i angivna områden. Styrningen kan ske på olika sätt; antingen så att kvanta endast emitteras i viss riktning eller så att kvanta efter växelverkan får en ökad sannolikhet att anta en given riktning. Viktningen innebär att varje inkommande partikel i ett givet område splittas upp i flera varvid dessa sedan spåras separat. Programmet korregerar sedan automatiskt för denna viktning innan det lämnar resultatet av simuleringen.

En mer utförlig beskrivning av MCNP kan återfinnas i Spanier & Gelbards "Monte Carlo principles and neutron transport problems"³.

³ Spanier & Gelbard (1969)

3.2 Simulerade spektra

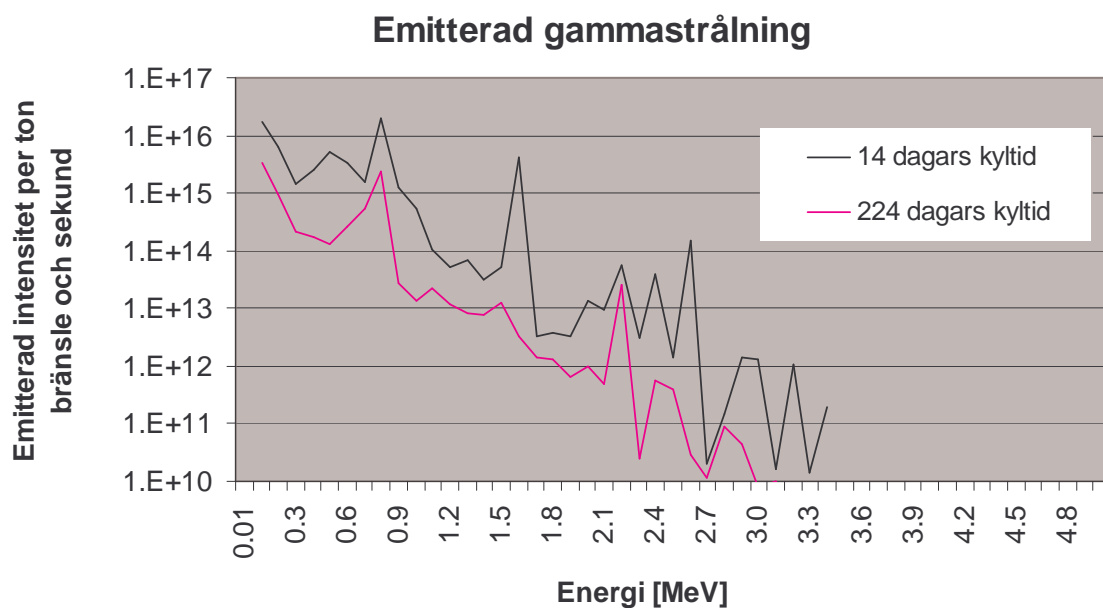
Pluto är avsedd att användas under revisionerna och bör bl.a. därför vara avsedd för bränsle med en kyltid på omkring 14 dagar. Kyltider av denna storleksordning är lämpligast även med hänsyn till att strålningen från de ämnen man vill mäta är särskilt framträdande efter denna tid.

Den energifördelning som använts vid simuleringarna i detta arbete är hämtade från ett datorprogram kallat Origen⁴. I Origen simuleras historiken för bränslet i en härd, varpå isotopsammansättning och därmed den radioaktiva strålningens energispektrum kan erhållas.

I detta arbete har två emissionsspektra använts:

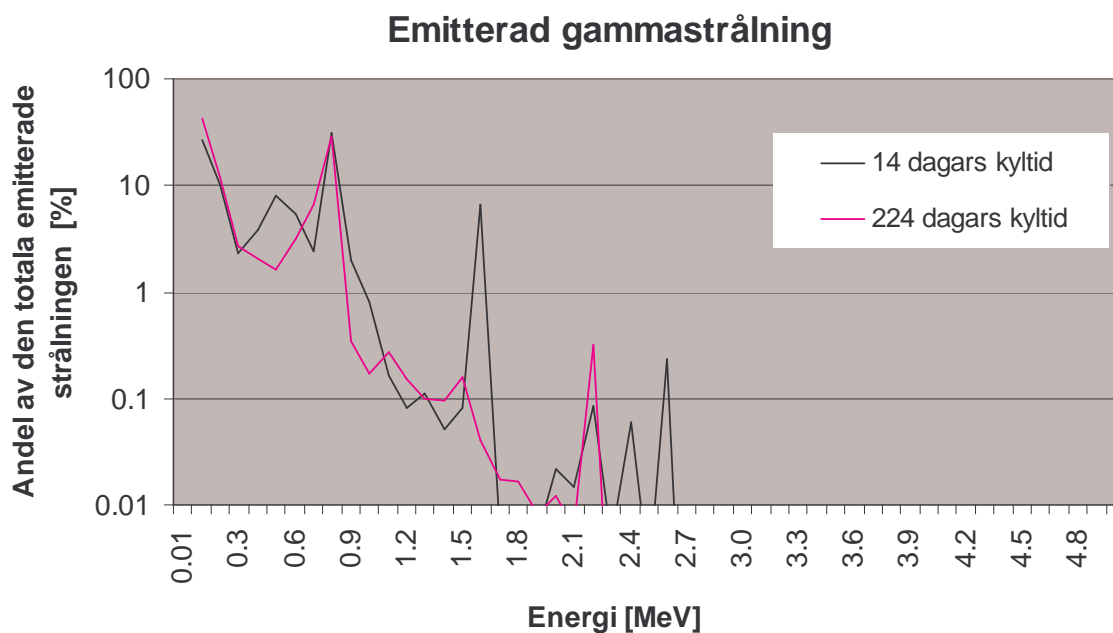
- 1) Bränsle som bestrålats ett år i härden och därefter vilat i två veckor
- 2) Bränsle som bestrålats ett år i härden och därefter vilat i 224 dagar, dvs. nästan åtta månader.

Dessa spektra åskådliggörs i figurerna 4 och 5, i de fall där inget annat nämns är det bränsle med två veckors kyltid som simulerats.



Figur 4.) De två emissionsspektra som använts i detta arbete. Mellan de två tidpunkterna, vid 14 dagar resp. åtta månader efter att bränslet tagits ur härden, har en stor del av strålningen hunnit klinga av.

⁴ Hermann & Westfall (1998)



Figur 5.) De olika energiintervallens andel av den totala emitterade gammastrålningen för bränslen med 14 dagars resp. åtta månaders kyltid.

I de datorsimuleringar som gjorts har strålningen från Origenpektrum indelats i intervall om 100 keV. De spektrum som Origen genererat börjar vid en energinivå av 1 eV och sträcker sig till 5 MeV, de är således indelade i 51 intervall. Resultaten har också extraherats i 51 intervall varav det lägsta intervallet har en tröskel som är något högre än den mest lågenergetiska emitterade strålningen.⁵

Av intresse för detta arbete är sönderfallet av isotopen Barium 140, vilken avger strålning på 1596 keV.⁶ Ba-140 strålningen hamnar således i intervallet 1500-1600 keV och strålningsintensiteten i detta intervall har i detta arbete antagits bero enbart på Ba-140 sönderfall. Av den totala gammastrålning som kärnbränslet avger 14 dagar efter reaktoravställning ligger 6,6% inom detta energiintervall.⁷

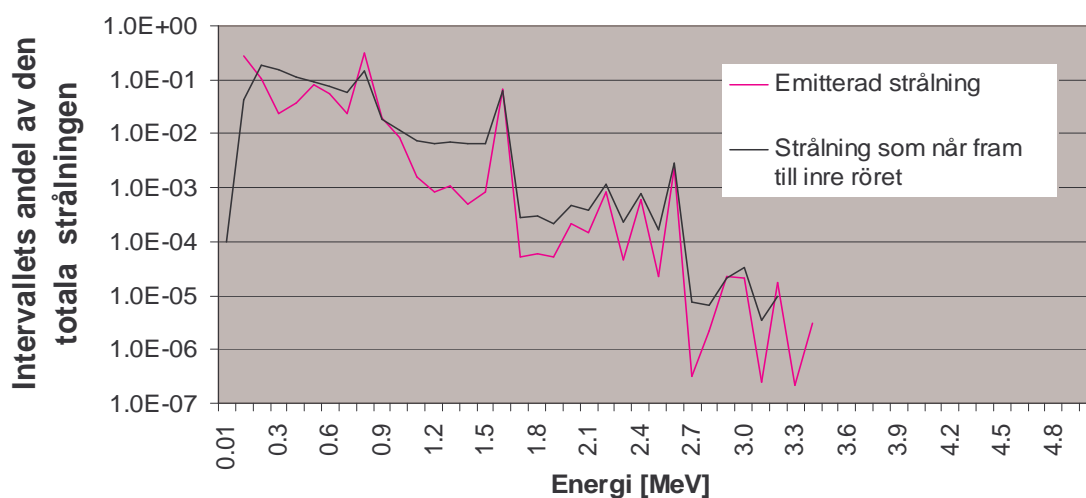
På sin väg från bränslet till detektorerna, framförallt då på sin väg ut ur bränslepatronen genom andra bränslestavar och genom vattnet i patronen, absorberas en del av den strålning som emitterats. Av de gammakvanta som emitteras i bränslepatronen är det bara drygt 15% som når ut ur densamma. I vattnet runt patronen och i Plutos innerrör absorberas ytterligare strålning. Det gör att antalet partiklar som når ut genom Plutos innerrör decimeras till ca 10 % av de emitterade partiklarna. I och med denna absorption ändras även strålningens energispektrum vilket åskådliggörs i figur 6.

⁵ För att inte avsätta datorkraft på detektion av ointressant lågenergetisk strålning har en diskriminatornivå placerats vid 10 keV.

⁶ Man konstruerar dock Pluto för att utan större ändringar kunna mäta även på andra isotoper som kan visa sig viktiga i andra sammanhang.

⁷ Gäller strålning av energier över 10 keV. Enligt siffror från Origen, Hermann & Westfall (1998)

Gammastrålning som når fram till Plutos inre rör



Figur 6.) Spektrum av den strålning som når fram till Plutos innerrör jämfört med strålningsspektrum emitterat från ett bränsleelement (exemplet hämtat från bränsle med 14 dagars kyltid)

För att få en så tydlig gammatopp som möjligt av Ba-140 strålningen och minimera bidrag från andra strålenergier kan filter användas, dessa absorberar en del av strålningen innan den når detektorerna. Eftersom större delen av den emitterade strålningen är mer lågenergetisk än Ba-140 strålningen så absorberas den mer i filtren. På så vis går det alltså i viss mån att filtrera fram den strålning Pluto avser att mäta.

4 Tillvägagångssätt

I några av MCNP-simuleringarna har en i stort sett verklig Plutogeometri simulerats. I många fall har detta dock inte varit möjligt då dessa simuleringar krävt längre exekveringstid för acceptabel noggrannhet än vad som funnits tillgängligt inom ramen för detta arbete. För att effektivisera simuleringarna har därför förfarandet vid en del av frågeställningarna approximerats så att all emitterad strålning kommer in genom den öppna spalten. På så vis har exekveringstiderna för erhållande av god statistik i detektorn kunnat kortas jämfört med fallet då man simulerar strålning från en hel bränslepatron.

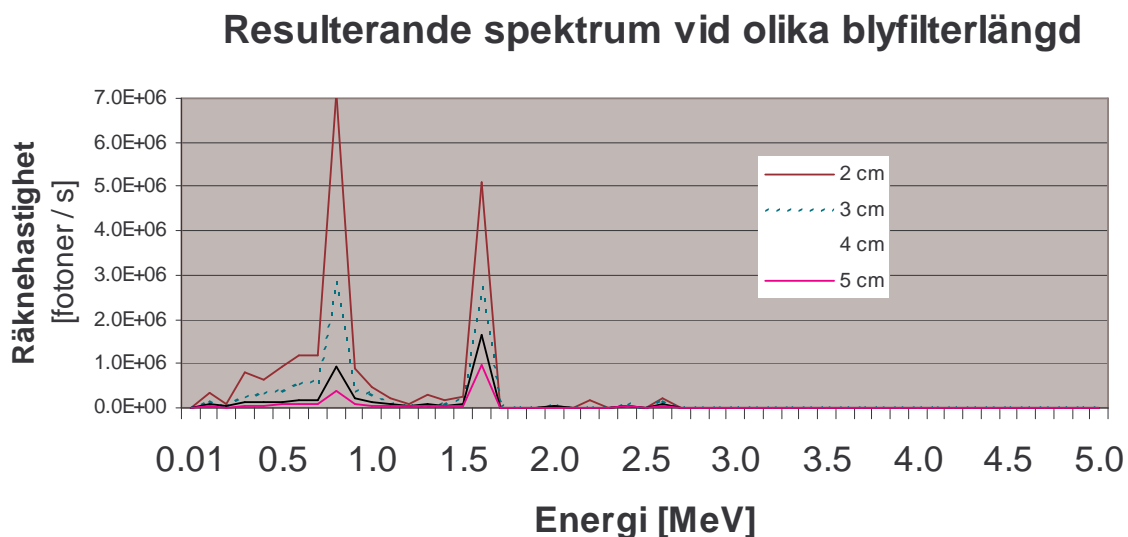
För simuleringar i syfte att undersöka överhörning samt att erhålla lämplig blyfilterlängd och placering av blyfiltret har en förenklad geometri använts. I dessa fall har en liten strålkälla simulerats i vardera spaltöppningen. Olika längd och placering av blyfilter har simulerats. För att ytterligare effektivisera beräkningarna har all strålning emitterats längs spaltens riktning samt vid varje kollision har fotonens nya riktning kraftigt styrts mot respektive detektor. En fjärde effektivitetshöjande åtgärd som MCNP medger är att multiplicera antalet fotoner som passerar in i en angiven del av geometrin med en faktor större än ett för att få större statistiskt underlag för händelser i detta område. Denna option av MCNP har utnyttjats och multiplikationsfaktorn har i dessa fall satts till 1000 för fotoner som når blyfiltret. Som nämnts i avsnittet om MCNP så tar programmet hänsyn till dessa faktorer då det lämnar sitt slutliga output.

I de fall där den strålning som spridits utanför själva kollimatoren varit väsentlig, eller där syftet varit att mäta denna spridda strålnings verkan, kan man vikta upp strålningen närmast detektorerna. Man kan däremot inte frångå Plutos geometri. Det gör att dessa simuleringar kräver betydligt längre exekveringstid än de med förenklad geometri. Simuleringarna har, trots sina längre exekveringstider, inte lämnat lika stort statistiskt underlag som de med förenklad geometri.

Genomgående vid simuleringarna har en bränslepatron för 64 stavar använts och en av stavplatserna har lämnats som vattenkanal, strålkällan har alltså bestått av 63 bränslestavar.

4.1 Blyfilterlängd

Den strålning som når blyfiltret ger genom sin växelverkan med blyet upphov till spridd strålning med lägre energi. På sin väg genom blyet filtreras dock en allt större del av denna lågenergetiska strålning bort.⁸ Den relativt högenergetiska strålning som är av intresse kommer på så sätt att bidra med större andel av den totala strålningen ju mer bly man sätter till. I figur 7 visas hur den lågenergetiska strålningen decimeras betydligt mer än den högenergetiska vid tilltagande blyfiltertjocklekar.



Figur 7.) Simuleringen visar att den lågenergetiska strålningen avtar betydligt mer än den högenergetiska vid tilltagande blyfilterlängd.

Det bör dock betonas att även fler av de högenergetiska fotonerna går förlorade i blyfiltrena ju mer bly man sätter till. Ett optimalt blyfilter ska därför vara tillräckligt långt för att nå en hög andel Ba-140 strålning, samtidigt ska det vara tillräckligt kort för att släppa in så mycket av denna strålning som möjligt för att därigenom ge så bra statistiskt underlag som möjligt i mätningarna.

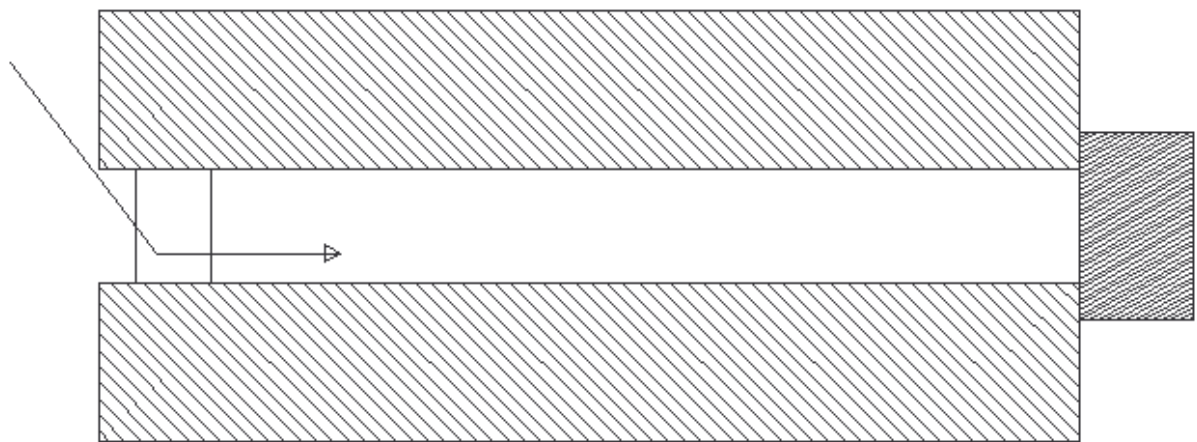
Simuleringarna är gjorda med små strålkällor placerade i spaltmynningarna och med hjälp av alla de variansreduktionsrutiner som är beskrivna närmare i avsnittet om MCNP.

⁸ Eftersom denna växelverkan även ger upphov till röntgenstrålning som belastar detektorerna, finns planer på att tillsätta även en tunn kopparplatta som ytterligare strålningsfilter i anslutning till blyfiltret

4.2 Blyfilterplacering

En annan parameter av intresse är var i spalten man ska placera blyfiltret. Inför val av blyplacering finns två mekanismer att ta hänsyn till. (1) Hur mycket av bränslets strålning når överhuvudtaget in i spalten. (2) Hur mycket av strålningen inne i spalten når fram till detektorn. Denna skillnad i problemställning visar sig vara av avgörande betydelse för simuleringsresultaten.

Mekanism 1. Placeras filtret precis i öppningen får det effekten att en del strålning som annars skulle kommit in i spalten snett, och därmed inte skulle ha nått detektorn, istället genom växelverkan kan komma att spridas in i spaltens riktning mot detektorn enligt figur 8.

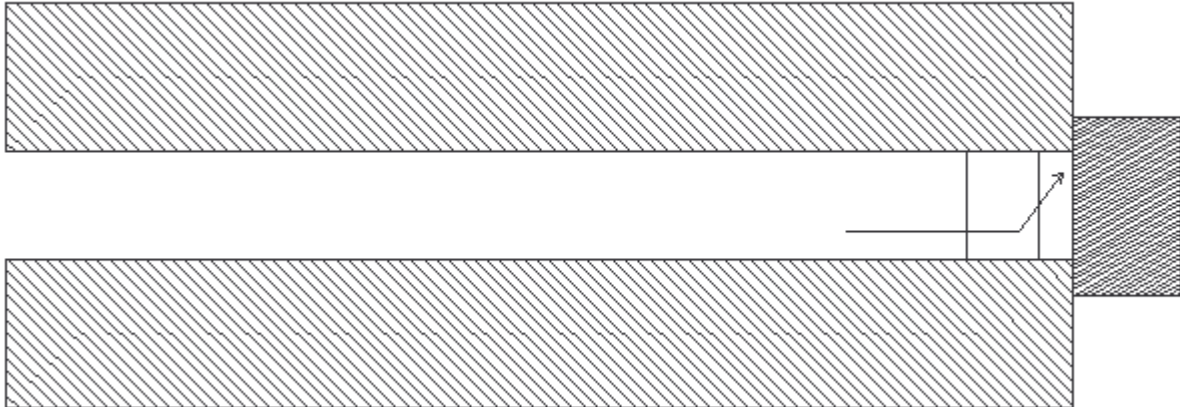


Figur 8.) Bilden illustrerar hur blyet sprider in strålning mot detektorn

Detta gör att detektorernas räknehastighet kommer att höjas något. Ett annat, större problem är dock att den geometriselektivitet som kollimatoren syftar att åstadkomma försämras. En större andel av den detekterade strålningen kommer att härröra från områden utanför de av kollimatoren utvalda. Filtret bör alltså inte sitta i direkt anslutning till spaltöppningen.

För att simuleringar av denna mekanism ska kunna anses relevanta förutsätts ett helt bränsleelement som strålkälla, geometrierna kan därmed inte förenklas särskilt mycket utan att mätresultaten blir mer eller mindre irrelevanta. Med anledning av detta har nödvändiga simuleringar visat sig bli mycket omfattande och de resultat som kunnat nås inom ramarna för detta arbete har blivit behäftade med oacceptabelt stora felmarginaler. Dessa resultat tas därför inte upp närmare här. Kvalitativt kan dock sägas att sannolikheten för en emitterad foton att nå fram till blyfiltret sjunker ju längre in i spalten blyfiltret sitter. Ju färre fotoner som på så sätt når fram till filtret, desto färre riskerar att spridas in till detektorerna. Eftersom strålningens växelverkan och spridning i kollimatoren i detta hänseende inte är primärt borde denna siffra dock kunna approximeras någorlunda genom teoretiska beräkningar, detta problem lämnas därför därhän i detta arbete.

Mekanism 2. Placeras filtret istället för långt in i spalten gör det att detektorn kommer att uppta en relativt stor del av rymdvinkeln från blyfiltret räknat. Det innebär att en del av den strålning som blyfiltret avser att skärma bort når fram till detektorn ändå, trots att fotonerna genom sin växelverkan har ändrat riktning i blyfiltret, se figur 9.



Figur 9.) Bilden illustrerar strålning som trots att den ändrat riktning då den växelverkat i blyfiltret når fram till detektorn.

De simuleringar av blyfilterplacering som vidare tas upp i detta arbete rör alltså detta problem. Genom att bara den strålning som väl kommit in i spalten är av intresse i detta fall behöver Plutos övriga geometri inte beaktas. Dessa simuleringar är därför gjorda med små strålkällor⁹ placerade precis i spaltöppningarna, och strålande enbart rakt mot detektorerna, för att ge så mycket strålning som möjligt fram till blyfiltrena. För att generera maximal statistik har dessutom samtliga de variansreduktionsrutiner som nämnts i kapitel 3.1 använts.

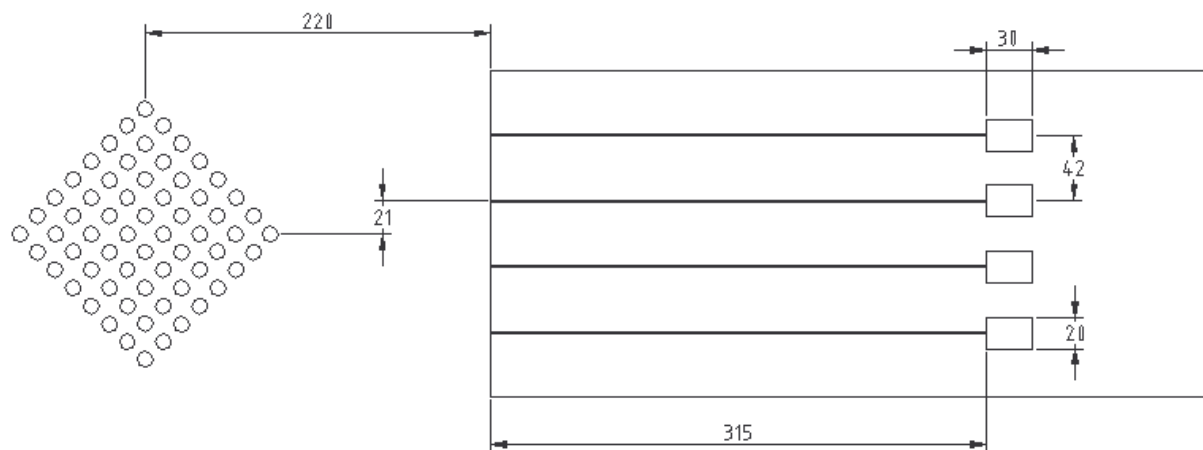
4.3 Spaltbredd & spalthöjd

I kombination med val av filterlängd kan mängden inkommande strålning regleras genom val av spaltbredd och spalthöjd. De utredningar som beskrivs i detta kapitel är enbart inriktade på att finna de spaltdimensioner som ger önskvärd mängd strålning fram till detektorerna vid en filterlängd av 20 mm. Spalthöjden ska alltså avpassas så att tillräcklig indata erhålles för bra statistik, samtidigt som räknehastigheten inte får vara högre än att mätutrustningen hinner hantera informationsflödet. Den önskvärda räknehastigheten för de detektorer med kringutrustning som kommer att användas ligger i storleksordningen 100 000 fotoner per sekund. Detektorernas räknehastighet och val av blyfilter är således det som styr valet av spaltdimensioner.

För att nedbringa räknehastigheten i den Plutoprototyp som provades i mars 2001 vill man inför nästa provkörning minska ner spaltbredden från tre mm till en eller kanske två mm. Samtidigt skulle man eventuellt kunna minska dess höjd något om så skulle vara lämpligt. Höjden är för närvarande 30 mm.

⁹ i form av cylindrar lika höga som spalten och med en diameter lika med spaltbredden, vilken i dessa simuleringar genomgående varit 1 mm.

Som nämnts i kapitel 1.2 så skyddar kollimatoren detektorerna från strålning så att dessa endast kan nås av strålning från bränslet mitt framför de öppna spalterna. Viss strålning kan dock komma snett in i spalten, växelverka med spaltväggen och komma att spridas in till detektorn ändå. Intensiteten och energinivån på denna spridda strålning beräknas enklast med hjälp av datorprogram som t ex MCNP. I detta fall, med geometrier vars huvuddrag framgår av figur 10, visade sig emellertid MCNP-simuleringarna bli mycket tidsödande för att uppnå acceptabel noggrannhet. Simuleringarna hade fortfarande efter ett par månaders exekverings-tid en felmarginal på 54-68 %. I MCNP's manual framgår att simuleringar med felmarginaler större än 50 % är att betrakta som oanvändbara. Med anledning av detta genomfördes en enklare teoretisk utredning i syfte att få en uppfattning av det totala fotonflödet till detektorerna. Denna utredning redovisas i appendix A.



Figur 10.) Bränsleelementets position i förhållande till kollimatoren vid simuleringar av räknehastigheter. I det illustrerade fallet är kollimatoren ej translaterad.

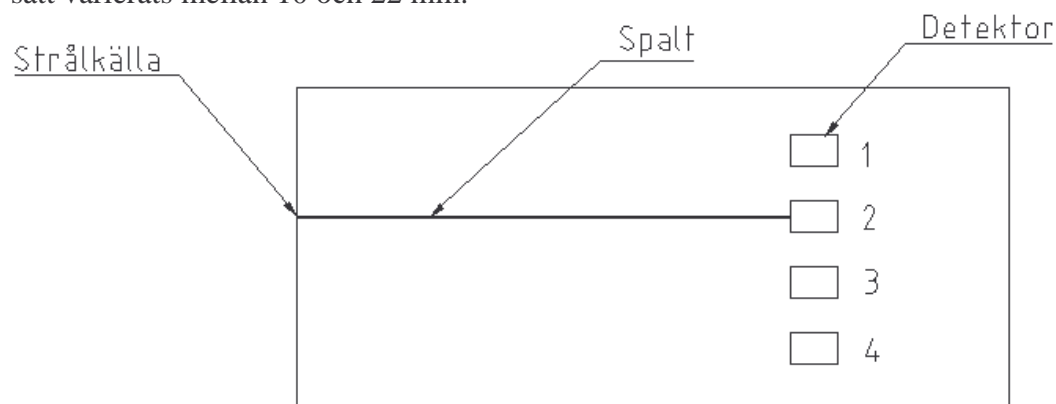
Under arbetets gång har önskemål om möjlighet att variera spaltstorleken kommit i dagen. För att möjliggöra ett vidare framtida användningsområde – kanske mätning av andra isotoper eller mätning av bränslen med helt annan utbränning eller andra kyltider – vill man kunna använda insatser med olika stor spaltbredd och spalthöjd. Konstruktion av sådana insatser redovisas i appendix B.

4.4 Överhörning

Trots att kollimatoren är gjord av en starkt attenuerande tungmetall så kan en betydande mängd strålning transmittas kortare sträckor genom materialet. En implikation av detta rör strålning som träffar en detektor och ger upphov till sekundärstrålning i denna. Sådan sekundärstrålning kan nämligen transmittas genom de relativt tunna väggarna till en närliggande detektor och belasta den med oönskad räknehastighet. Detta fenomen kallas överhörning. Hur pass mycket detektorerna på detta sätt kan påverka varandra har undersökts i detta arbete. Då det emellertid är en mycket liten andel strålning som sprids mot och dessutom tar sig fram till nästa detektor så har datorsimuleringarna inte gett så stort statistiskt underlag vilket gör att felmarginalerna är ganska stora.

Dessa simuleringar har skett genom att kollimatorspalterna 1, 3 och 4 har spärrats igen och ett strålande preparat har simulerats i spaltöppningen på spalt 2, se figur 14.

Konsekvenserna av olika mängd material mellan detektorerna har sedan studerats genom att detektor 1 och 3 flyttats relativt detektor 2. Mängden material mellan detektorerna har på detta sätt varierats mellan 10 och 22 mm.



Figur 11.) Den simulerade geometrin vid undersökning av överhörning. Detektorerna har sedan flyttats relativt varandra för att simulera olika överhörning.

5 Resultat

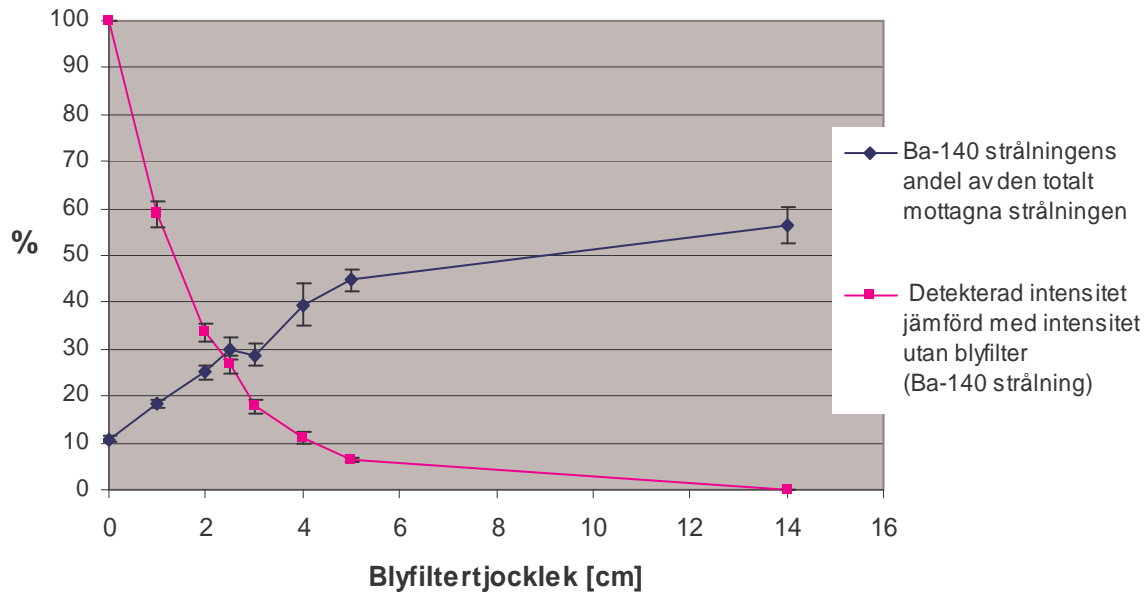
5.1 Blyfilterlängd

Simuleringarna visar att andelen Ba-140 strålning ökar med tilltagande filterlängd enligt tabell 1 och figur 12. Simuleringarna visar även tydligt hur både den totala strålintensiteten och Ba-140 strålningen avtar med tilltagande filtertjocklek.

Blyfilterlängd	total / total utan bly	Ba-140 / Ba-140 utan bly	Andel Ba-140
0 cm	100 %	100 %	10,9 %
1 cm	34,7 %	58,8 %	18,5 %
2 cm	14,5 %	33,6 %	25,2 %
2,5 cm	9,7 %	26,8 %	30,1 %
3 cm	6,7 %	17,8 %	28,8 %
4 cm	3,0 %	11,0 %	39,4 %
5 cm	1,5 %	6,3 %	44,8 %
14 cm	0,008 %	0,04 %	56,4 %

Tabell 1.) Kolumn 1 visar hur stor andel av strålningsintensiteten från hela Origenspektrum som tar sig igenom given blymängd. Kolumn 2 visar hur den andel av strålningen som ligger inom intervallet 1500-1600 keV tar sig igenom en given blymängd på motsvarande sätt. Kolumn 3 visar hur andelen strålning i intervallet 1500-1600 keV kommer att öka med tilltagande blyfilterlängd i och med att denna strålning har relativt hög penetrationsförmåga.

Följder av olika blyfiltertjocklek



Figur 12.) Andelen Ba-140 tilltar med ökande blyfilterlängd och bör vara så hög som möjligt. Med tilltagande blyfilterlängd minskar dock det totala strålbidraget vilket kan innebära att oacceptabelt långa mättider krävs för att uppnå önskat statistiskt underlag. Man måste således göra en kompromiss mellan dessa båda faktorer. Det bör noteras att räknehastigheten är starkt beroende av spaltens dimensioner, därför bör blyfiltrets tjocklek bestämmas i samband med att dessa dimensioner fastställs, se avsnitt 4.3.

Vilken filtertjocklek som ska väljas måste avgöras i samband med beslut om vilken spaltstorlek som ska användas. Figur 12 ger dock ledning om att det bör vara lämpligare att använda en relativt stor spalt och långt blyfilter än tvärtom, eftersom detta ger en högre andel Ba-140 strålning. Samtidigt bör det på så sätt bli en bättre konstruktionslösning i syfte att kunna variera mängden inkommande strålning för att kunna använda Pluto till andra bränslen. Det bör bli både enklare och billigare att ha ett antal olika långa blyfilter att byta mellan än att byta ut hela den tungmetallinsats som definierar spaltstorleken.

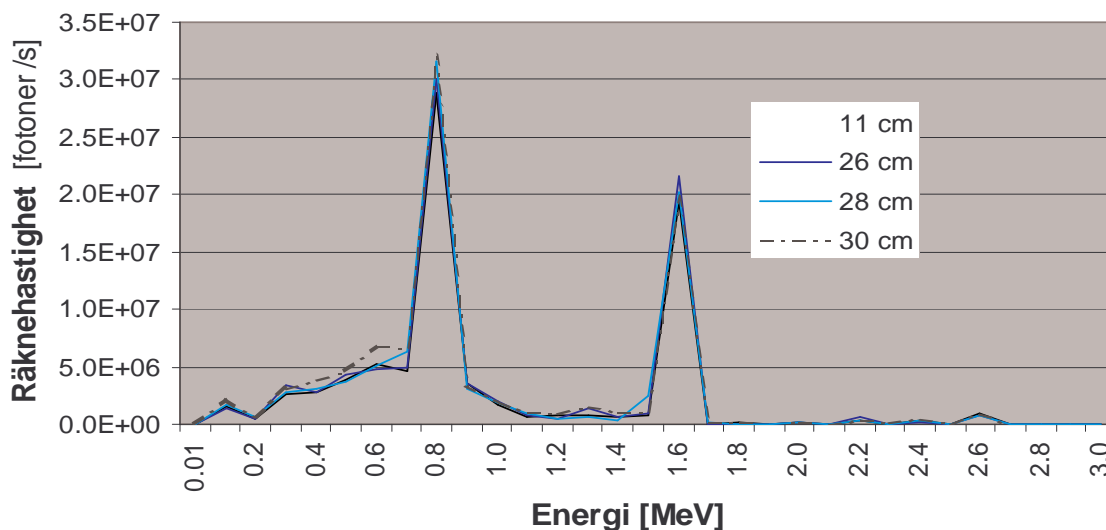
5.2 Blyfilterplacering

De gjorda simuleringarna visar att strålfödet i detektorerna ökar först när blyfiltren placeras närmare än ca 4 cm från detektorn.¹⁰ Detta åskådliggörs i figurerna 13 och 14:

¹⁰Då ingen hänsyn tagits till de förändringar av strålningsbilden som sker då filtret sitter nära spaltöppningen, se vidare kapitel 4.2.

Olika placering av blyfilter

(givet avståndet från spaltens början till mitten på blyfiltret)

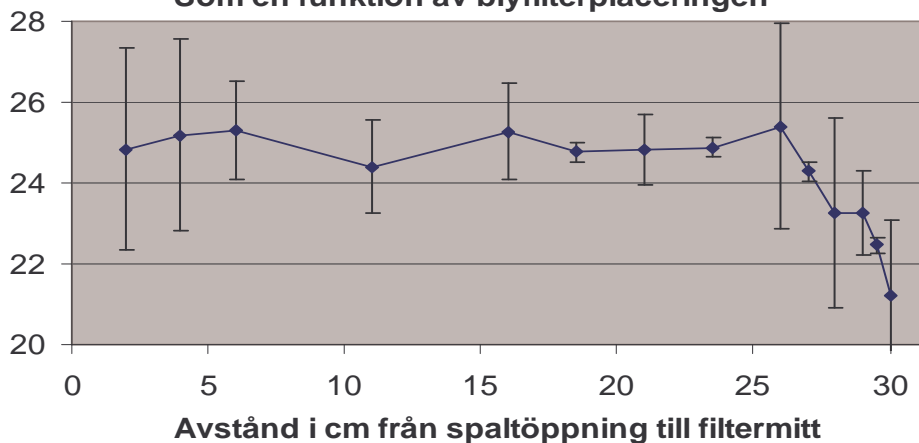


Figur 13.) Simuleringen visar den detekterade spektralfördelningen för olika placeringar av blyfiltret. Notera avvikelserna i intervallet 500-700 keV där graferna ligger lite högre för de blyfilter som placerats allra längst in i spalten. De angivna avstånden gäller från spaltöppningen fram till mitten på ett 20 mm blyfilter. Vid den innersta placeringen av filtret är det således bara 5 mm mellan filtret och detektorn.

Den strålning som tilltar vid filterplaceringar nära detektorn har energier på ungefär 500-700 keV (se figur 13) och kan härröras till spridning i filtret. I och med att denna strålning höjer detektorns totala mottagna strålning så minskar andelen mottagen strålning som ligger i intervallet 1500 - 1600 keV något enligt figur 14.

Andel av strålningen som håller energin 1500-1600 keV [%]

Som en funktion av blyfilterplaceringen



Figur 14.) Andelen gammastrålning i intervallet 1500 - 1600 keV i relation till var i spalten blyfiltret placerats. (Simulering utifrån ett origenspektrum filtrerat genom 20 mm bly.)

Diagrammet i figur 14 har tagits fram genom olika stora simuleringar vilket har gett upphov till olika noggrannhet i resultaten. Standardavvikelsen har på så sätt kommit att variera mellan 0,5 och 9 % i de olika simuleringarna på det sätt som åskådliggörs i figuren.

Av figur 14 framgår att andelen direkt strålning är förhållandevis konstant genom hela spalten med undantag av de sista centimetrarna då den sjunker något, med hänvisning till diskussionen i avsnitt 4.2 kan kurvan antas sjunka något även vid spaltöppningen. Utifrån dessa två problemfaktorer antogs därmed att blyfiltret inte bör sitta i nära anslutning till någon av spaltens ändar. Det står då bortsett från ändpartierna i stort sett fritt att placera filtren där det är lämpligast rent tillverkningstekniskt.

5.3 Spaltbredd & spalthöjd

De beräkningar som gjorts i appendix A antyder en räknehastighet, vid mätningar på bränsle med 14 dagars kyltid, om i storleksordningen 100 000 fotoner per sekund vid 1×10 mm spalt och 20 mm blyfilter. Detta är även i överensstämmelse med andra liknande beräkningar som gjorts.¹¹ Med ledning av detta och eftersom för låg räknehastighet är att föredra framför för hög dito¹² valdes 1×10 mm spalter och 30 mm blyfilter. Denna konstruktionslösning ger, med siffror från appendix A och tabell 1, en teoretisk räknehastighet på i storleksordningen 60 000 fotoner per sekund vilket anses vara en lämplig nivå.

5.4 Överhörning

I figur 15 har den totala mängden strålning som härrör sig från överhörning satts i relation till intensiteten i en direkt bestrålad detektor. Syftet är att visa på inverkan av den totala störningen i relation till den del av mätresultaten som är intressanta.

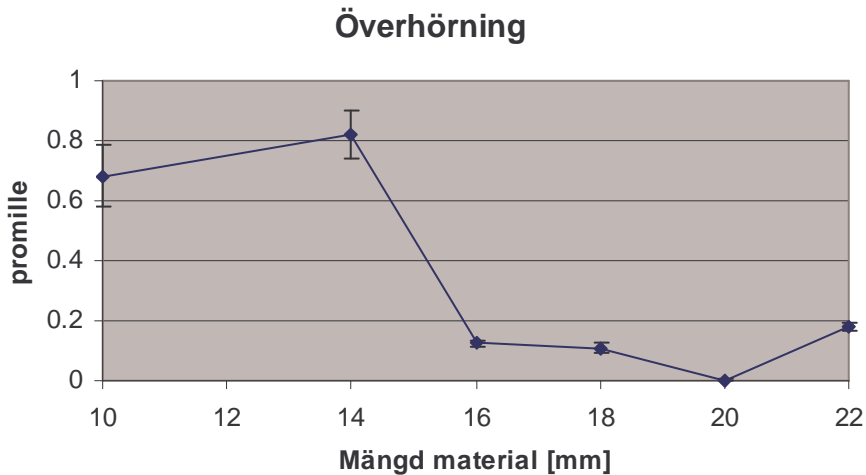
MCNP-simuleringarna visar att redan vid 10 mm skärmande material så har andelen strålning i intilliggande detektor sjunkit till under en promille¹³. Vid 20 mm överhörning har strålningen i intilliggande detektor sjunkit till några ppm av den strålning som den direkt utsatta detektorn får ta emot.

Diagrammet visar inte någon tydlig trend men det går dock att utläsa storleksordningen av överhörningens påverkan. Eftersom de intressanta mätresultaten inte påverkas med mer än några promille kan 10 mm gods anses vara fullt tillräckligt mellan detektorerna.

¹¹ Muntlig uppgift från Staffan Jacobsson, ISV Uppsala universitet

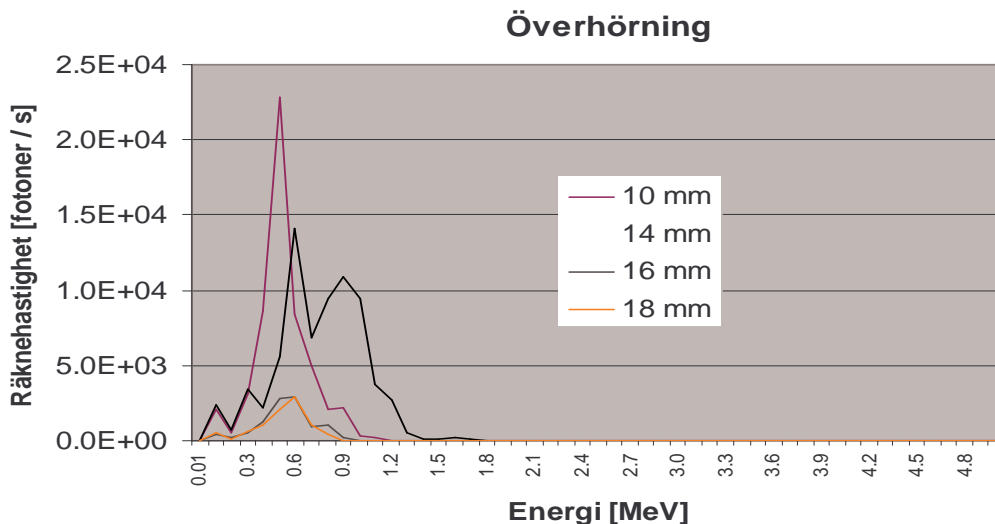
¹² För små spalter ger låg räknehastighet vilket gör att mättiderna kommer att bli onödigt långa, för stora spalter däremot gör att detektorerna inte hinner hantera informationen och mätningarna ger således inget resultat.

¹³ $0,7 \pm 0,1$ promille



Figur 15.) Den totala intensitet som når fram till en intelligande detektor, i relation till intensiteten strålning mottagen hos en direkt bestrålad detektor.

Några typiska spektra för överhörningssimuleringarna åskådliggörs i figur 16. Här kan man se att andelen strålning i energiområdet 1500-1600 keV är mycket låg eller obefintlig i de intelligande detektorerna. Av den strålning som en intelligande detektor mottar är det endast någon miljondel som har så hög energi som detta intervall. Detta är helt naturligt med tanke på att den relativt högenergetiska strålningen sprids framåt i långt högre grad än den lågenergetiska. Även om en av graferna avviker en del så är det tydligt att det är strålning av energier omkring 400-1000 keV som ger det betydande bidraget till räknehastigheten i en intelligande detektor. Endast en mycket liten andel av den mer högenergetiska Ba-140 strålningen får så stor spridningsvinkel som krävs för överhörning av detta slag.



Figur 16.) Spektrum hos den strålning som växelverkat i en detektor och på så sätt kommit att spridas till en intelligande detektor.

Slutsatsen är därmed att den strålning som spridits från en detektor vidare till en annan bidrar mycket litet till räknehastigheten och inte alls till den relevanta delen av spektrat hos den intelligande detektorn förutsatt att minst 10 mm skärmande material finns mellan detektorerna.

6 Mekanisk konstruktion

Denna del av arbetet består snarast av klassisk konstruktion med hänsyn till de strålningsfysikaliska aspekter som utretts tidigare i denna rapport. Arbetet har skett i samråd med Henry Andersson på Ollajvs produktutveckling AB (Uppsala) samt konstruktionsföretaget Rigel Consult AB (Gävle).

Enligt diskussionen i avsnitt 2 samt för att bättre fånga upp den mer högenergetiska strålningen ska nya, större detektorkrystaller användas i nästa version av Pluto.¹⁴

Då detektorerna är mycket ljuskänsliga måste de skyddas av inkapslingar. Dessa inkapslingar ska även inrymma nya PM-rör och ett mindre kretskort. Förutom ljustätheten är inkapslingarna även tänkta att stå emot mindre mekaniska påfrestningar, att hålla PM-röret dikt an mot kristallen samt att hålla hela detektorpaketet samlat i en enhet för att underlätta montage och handhavande.

För att få plats med detektorkapslarna i kollimatoren krävs dessutom en ny geometrisk utformning av detektorutrymmet i kollimatoren. Eftersom den Volframlegering som kollimatoren är gjord av är relativt dyr så vill man så långt det är möjligt behålla det befintliga kollimatormaterialet. Detektorutrymmet måste därmed fräsas ur från den befintliga kollimatorns byggstenar då de nya detektorkapslarna är väsentligt större än de förut använda detektorerna.

6.1 Detektorkapseln

Kollimatoren är uppbyggd av 25 st lösa element, mellan vissa av dessa block finns en öppen luftspalt för att undvika värmekonvektion från den del av kollimatoren som ligger närmast bränslet bak till detektorerna, se figur 3. Genom blocken går dessutom 8 st kylvattenkanaler. Det gör att det inte finns så mycket utrymme åt detektorkapslarna och det är därför av vikt att hålla dessa så små som möjligt.

För att kunna hålla exakta mått och för att undvika skevhet och fogdefekter skall detektorkapseln utföras genom urfräsning ur ett massivt block av dural, en mycket bearbetbar aluminiumlegering med låga inre spänningar.

För att hålla detektorinkapslingen absolut ljustät behövs någon form av packning mellan låda och lock. För att hålla nere dimensionerna på lådan så att inte mängden starkt attenuerande kollimatormaterial mellan två detektorer blir för litet måste godstjockleken i lådan hållas låg, ca 1 mm. Detta gör det olämpligt att använda en vanlig packning eller O-ring, sådana har även den bieffekten att de vid sammanpressning orsakar ett tryck som tenderar att bukta locket. Om man istället använder packningspasta så undviker man detta mottryck samtidigt som spåret där pastan läggs inte behöver vara så brett som om man använt en O-ring. Man vill dock trots packningens skyddande verkan ha ett spår och en motsvarande klack i locket som extra skydd för eventuell ljusinstrålning.

¹⁴ Därav är nya detektorkrystaller med måtten $30 \times 20 \times 50$ mm beställda, att jämföra med de tidigare använda vilka har måtten $18 \times 8 \times 70$ mm.

På grund av överhörningsproblematiken som diskuterats i avsnitt 4.4 bör kapseln vara så smal som möjligt mellan detektorerna medan den kan tillåtas vara lite bredare högre upp där PM-röret sitter. Eftersom PM-röret har ett horisontellt tvärsnitt på 30×30 mm medan detektorkristallen har tvärsnittet 20×30 mm kommer kapseln därför att få en midja. I botten på kapseln läggs en liten bladfjäder som pressar kristallen mot PM-röret vilket i sin tur pressas mot den lilla elektronikenheten, denna hålls emot av två falsar på innerväggen i kapseln. Ovanför det hela lämnas ett utrymme på 20 mm för infästning och avlastning av nödvändigt kablage. Detektorkapseln kommer därmed att få den form som framgår av bifogade konstruktionsritning, se appendix B.1.

6.2 Spaltutformning

För att hålla en viss flexibilitet i systemet så att det går att mäta på olika bränslen, och för att kunna korrigera räknehastigheten utan omfattande konstruktionsförändringar, ska kommande prototyp utrustas med utbytbara spalter. Detta löses så att spalten fräses ut i en löstagbar hylsa inne i kollimatoren, i denna hylsa görs plats för en utbytt bländare. För att få plats med hylsorna måste de befintliga kollimatorplattorna fräsas ur runt de spalter som finns idag. I de tudelade hylsorna fräses en spalt på 1×10 mm med ledning av de resultat som lämnats i avsnitt 5.3. Hylsorna tillverkas med en stegvis tilltagande diameter för att omöjliggöra uppkomsten av raka strålgångar (utöver spalterna) från bränslet in till kollimatorns inre. För att bibehålla kollimatorns geometriselektivitet måste spalthisorna tillverkas med mycket fina toleranser. Vidare konstruktion av själva spalthisan har utretts av Rigel Consult AB.

Bländaren i sin tur är också tudelad och i denna görs utrymme för blyfilter och intilliggande kopparfilter med upp till 46 mm längd. Den spalt som genomlöper bländaren görs något större än den genom spalthisan, detta för att säkerställa att bländaren inte på något sätt hindrar den strålning som löper genom spalten på båda sidor om bländaren. En närmare beskrivning av bländarens utformning framgår i bifogade konstruktionsritningar, se appendix B. 2.

6.3 Pluggutformning

I stället för den utanpåliggande blyskärmning som konstruerats inför proven i mars 2001 är det eftersträvarsvärt att på något sätt täppa igen PM-rörskanalerna så mycket som möjligt med skärmande material. Då nya och mindre PM-rör och kretskort används kan detta utrymme nämligen fyllas igen. Man söker alltså en konstruktion som inte hindrar mätanordningens rörlighet, som skärmar tillräckligt, är så billig som möjligt i tillverkning och så monterings- och servicevänlig som möjligt.

Då det ansågs värdefullt att kunna ta ur detektorerna utan omfattande demonteringar valdes en lösning där PM-rörskanalerna fräses ur till en tvärsnittsytta motsvarande detektorkapselns tvärsnitt (se avsnitt 6.1). Detektorerna kan därmed sättas på plats uppifrån, genom dessa kanaler. Önskad skärmning erhålls därefter genom att i varje kanal placera en 70 mm lång plugg med ett tvärsnitt på 34×39 mm. Pluggen görs i två delar för att ge plats åt detektorkablarna som dras upp mitt igenom denna i en slinga som är lagd på så sätt att det inte lämnas någon rak strålgång in till detektorn.

För att inte belasta detektorkablarna med pluggens tyngd görs pluggen ett par mm bredare än detektorkapseln och placeras på en avsats som fräses ur i kollimatoren. Pluggens utformning redovisas i bifogade konstruktionsritning, appendix B.3.

7 Referenser

Briesmeister J. F. *MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code - version 4C*
Los Alamos National Laboratory USA 2000

Hermann O. W. & Westfall R. M. *ORIGEN-S* Oak Ridge National Laboratory USA 1998

Jacobsson, Staffan Doktorand vid institutionen för strålningsvetenskap på Uppsala Universitet och delaktig i projekt Pluto, Muntlig uppgift 2002-04-24

Spanier, Jerome & Gelbard, Ely M. *Monte Carlo principles and neutron transport problems*
(Reading, Mass., USA 1969)

Appendix A

Teoretiska beräkningar av förväntade räknehastigheter

A.1 Geometrin för vilken beräkningarna är gjorda

Utrustningen har antagits vara roterad 45° kring bränslet och kollimatoren har antagits vara centrerad kring detta. En kollimator med följande dimensioner har beaktats:

Längd: 315 mm

Höjd: 10 mm

Bredd: 1 mm

Avstånd från bränslets centrum: 220 mm

Spalterna har sinsemellan ett avstånd från mitt till mitt på 42 mm. De mittersta spalterna är därmed parallellförskjutna 21 mm från staven närmast kollimatoren, se figur A.1. De yttre spalterna är då således parallellförskjutna 63 mm från samma stav. Vid denna position står de inre kollimatorspalterna nästan mitt för en av bränslestavsraderna medan de yttre spalterna hamnar i stort sett mittemellan två bränslestavsraderna enligt figur A.1. Det gör att den del av bränslepatronen som kan ge direkt strålning till detektor 1 och 4 inte innehåller särskilt mycket emissivt material i det läge för vilket beräkningarna gjorts, se figur A.1 och A.2.

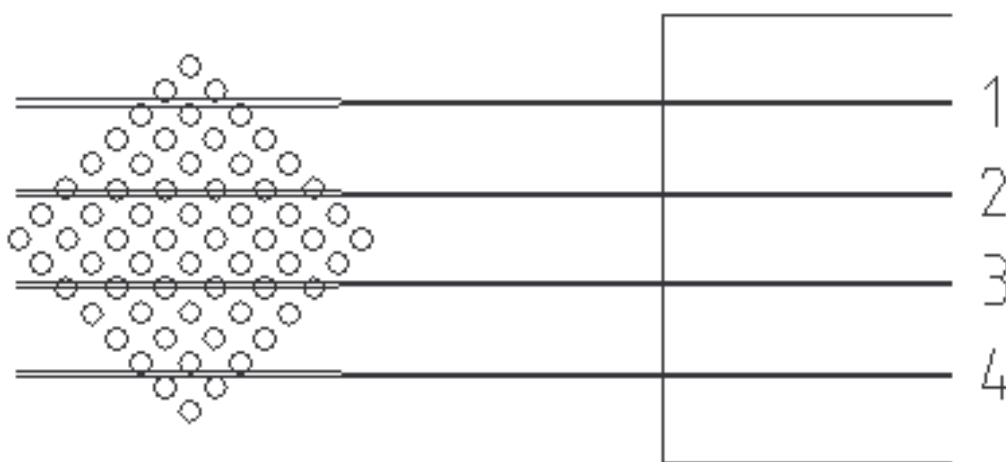
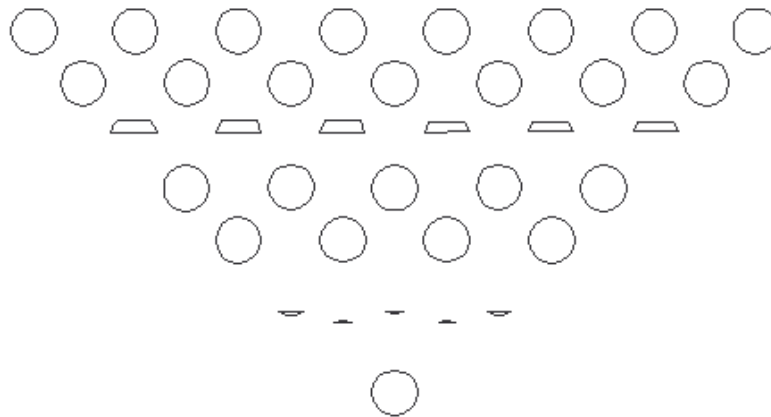


FigurA.1.) Den tvärsnittsarea av bränslet som ger strålbidrag till detektorerna vid 1 mm spaltbredd¹⁵

¹⁵ Den stavlängd som kan bestråla detektorerna approximeras med den stavlängd som idealt kan bestråla detektorerna på bränslets medelavstånd från kollimatoren.



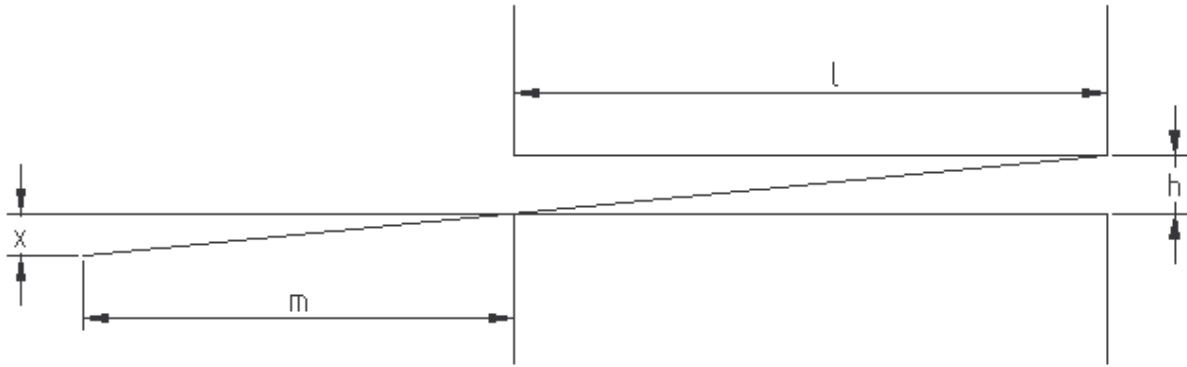
Figur A.2.) En förstoring av bränsleelementet i figur A.1. med förtydligande av hur liten del av de aktuella stavarna som idealt kan ge direkt strålning in i spalterna.

Detektor 1 och 4 borde alltså i denna position erhålla betydligt mindre strålning än detektor 2 och 3. Till det hela kommer att bränslets närmsta delar ligger längre ifrån kollimatoren vid spalterna 1 och 4 än det gör vid spalterna 2 och 3. Den rymdvinkel som spalt 1 och 4 upptar från bränslet räknat blir därmed mindre vilket ytterligare bidrar till att mindre strålning bör komma in genom dessa spalter.

A.2 Beräkningar

Strålfältet från ett bränsle som tillbringat ett år i härden och därefter svalnat i fjorton dagar har beaktats. Enligt Origen strålar detta med en total intensitet av $6,37 \times 10^{16}$ gammakvanta per ton och sekund.

Den stavhöjd som kan generera strålning in till detektorerna växer ju längre ifrån kollimatoren staven står; då staven står 53,5 cm ifrån detektorerna (dvs. 22 cm från kollimatoren vilket motsvarar mitten på bränsleelementet) och vid en spalthöjd av 10 mm är denna stavhöjd enligt nedan ungefär 24 mm. Full intensitet erhålls dock bara från centrala delar. Den effektiva höjden, motsvarande om alla delar ger full intensitet, är 17 mm. För enkelhets skull har alla stavar approximerats ha denna höjd i dessa uträkningar.



Figur A3.) Skiss utvisande hur den stavhöjd som kan ge strålningsbidrag till detektorerna ökar med tilltagande avstånd från kollimatoren.

$$2x + h = 2\left(\frac{h}{l} \times m\right) + h$$

$$2\left(\frac{10}{315} \times 220\right) + 10 = 23,96$$

Yttre spalterna

Den emitterande area vid 1 mm spalt som åskådliggjorts i fig. 12 & 13 är för de yttre spalterna sammanlagt $0,09 \text{ cm}^2$. Det innebär att mängden strålände material i detta område är:

$$0,09 \times 1,7 \times 10,5 \text{ g/cm}^3 = 1,61 \text{ gram}$$

Den gammaintensitet som under nämnda förutsättningar avges från 1,61 gram bränsle är:

$$1,61 \times 6,37 \times 10^{10} = 1,03 \times 10^{11} \text{ gammakvanta per sekund}$$

Vid ett antagande att all denna strålning emitterats 220 mm från spaltöppningen kan antas att sannolikheten för ett gammakvanta att nå fram till detektorn är:

$$\frac{A_{\text{det}}}{4\pi r^2} = \frac{10}{4\pi 535^2} = 2,78 \times 10^{-6}$$

Strålningsintensiteten i detektor 1 och 4 med en $1 \times 10 \text{ mm}$ spalt borde därmed bli:

$$(1,03 \times 10^{11}) \times (2,78 \times 10^{-6}) = 3 \times 10^5 \text{ gammakvanta / s}$$

Används sedan ett 20 mm blyfilter återstår efter detta endast $14,5 \%^{16}$ av den totala räknehastigheten; vi har då en räknehastighet på ca 40 000 gammakvanta per sekund.

¹⁶ Enligt mätresultat redovisade i avsnitt 5.1.

I detta räkneexempel är dämpningen mellan emissionspunkten och kollimatoren ej beaktad, vilket torde innebära att den sanna intensiteten är något lägre.

Inre spalterna

Vid en motsvarande uträkning av räknehastigheten i de inre detektorerna bör man även ta hänsyn till det faktum att bränslestavarna skymmer varandra och att stavarna närmast kollimatoren därmed attenuerar en betydande del av den strålning som emitterats i de bakre stavarna.

Den area av varje stav som kan emittera strålning in till detektorn har liksom i föregående uppgift beräknats med AutoCads areaberäkningskommando. Areorna har storlekar som följer, med staven närmast kollimatoren angiven först, här anges även stavarnas olika rymdvinklar relativt detektorerna i samma ordning:

<u>Area</u>	<u>rymdvinkel</u>
$A_1=0,183 \text{ cm}^2$	$3,49 \times 10^{-6}$
$A_2=0,199 \text{ cm}^2$	$3,18 \times 10^{-6}$
$A_3=0,211 \text{ cm}^2$	$2,90 \times 10^{-6}$
$A_4=0,224 \text{ cm}^2$	$2,66 \times 10^{-6}$
$A_5=0,238 \text{ cm}^2$	$2,45 \times 10^{-6}$
$A_6=0,247 \text{ cm}^2$	$2,27 \times 10^{-6}$

Attenueringskoefficienten $e^{-\mu d}$ har antagits med hjälp av två förenklingar: μ har approximerats ha det konstanta värdet $0,077 / \text{mm}$ vilket gäller för urandioxid vid monoenergetisk strålning hållande $1,0 \text{ MeV}$. Bränslestavsdiametern i dessa uträkningar är $10,0 \text{ mm}$. Den genomsnittliga mängd material strålningen måste tränga igenom har satts till $7,0 \text{ mm}$ per bränslestav. Detta ger att varje stav attenuerar 42% av den strålning som emitterats i de tidigare. För enkelhets skull har antagits att stavarna inte attenuerar något av den strålning som emitterats inom samma stav. Densiteten för urandioxiden har satts till $10,5 \text{ g/cm}^3$.

$$\bar{h} \times \rho \times (\text{emission} / \text{g} \times \text{s}) \times$$

$$(A_1 \times \angle_1 + A_2 \times \angle_2 \times e^{-\mu} + A_3 \times \angle_3 \times (e^{-\mu})^2 + A_4 \times \angle_4 \times (e^{-\mu})^3 + A_5 \times \angle_5 \times (e^{-\mu})^4 + A_6 \times \angle_6 \times (e^{-\mu})^5) =$$

$$1,7 \times 10,5 \times 6,37 \times 10^{10} \times (0,183 \times 3,49 \times 10^{-6} + 0,199 \times 3,18 \times 10^{-6} \times e^{-\mu} + 0,211 \times 2,90 \times 10^{-6} \times (e^{-\mu})^2 + 0,224 \times 2,66 \times 10^{-6} \times (e^{-\mu})^3 + 0,238 \times 2,45 \times 10^{-6} \times (e^{-\mu})^4 + 0,247 \times 2,27 \times 10^{-6} \times (e^{-\mu})^5) =$$

$$1,137 \times 10^{12} \times (6,39 \times 10^{-7} + 3,67 \times 10^{-7} + 2,06 \times 10^{-7} + 1,16 \times 10^{-7} + 6,60 \times 10^{-8} + 3,68 \times 10^{-8}) =$$

$$1,137 \times 10^{12} \times 1,43 \times 10^{-6} = 1,6 \times 10^6 / \text{s}$$

Efter att denna strålning passerat ett 20 mm blyfilter återstår enligt avsnitt 5.1 ungefär 14,5 %, vilket innebär en räknehastighet på ungefär 240 000 gammakvanta per sekund. Sannolikt blir räknehastigheten dock lägre eftersom μ -värdet som använts gäller 1,0 MeV strålning, vilket enligt avsnitt 3.2 är högre än strålningens medelenergi. Vid strålning med lägre energier blir attenueringen i både urandioxiden och blyfiltret högre. Till sist bör påpekas att den faktiska räknehastigheten även påverkas av ett flertal andra faktorer, tex. spridd strålning, vilket leder till högre räknehastigheter, samt dämpning i vatten och konstruktionsmaterial, vilket leder till lägre räknehastigheter.

Sammanfattningsvis ger dessa teoretiska beräkningar en räknehastighet om i storleksordningen 10^5 /s, dvs. samma storleksordning som datainsamlingsystemet är planerat för.

Appendix B

Konstruktionsritningar

B 1.) Konstruktionsritningar över Detektorkapsel

Översiktsritn. Kapsel	Ritn.nr. 08-0400-3
Detektorkapselhus	Ritn.nr. 08-0401-3
Detektorkapsellock	Ritn.nr. 08-0402-3
Kabelgenomföring	Ritn.nr. 08-0403-4
Glidstöd	Ritn.nr. 08-0404-4
Bladfjäder	Ritn.nr. 08-0405-4

B 2.) Konstruktionsritningar över Bländare

Översiktsritn. Bländare	Ritn.nr. 08-0410-3
Bländarhus del 1.	Ritn.nr. 08-0406-3
Bländarhus del 2.	Ritn.nr. 08-0407-3
Blyfilter	Ritn.nr. 08-0408-4
Kopparfilter	Ritn.nr. 08-0409-4

B 3.) Konstruktionsritning över Detektorkanalsplugg

Totalritning	Ritn.nr. A1232-02
--------------	-------------------