



## Kalibrationsdetektor för Crystal Ball

Thomas Axelsson  
Vedad Babic  
Per M Hansson  
Johannes Laurell Håkansson  
Nikita S Kudelkin  
Niklas Rosholm

Handledare:  
Andreas Heinz  
Co-Handledare:  
Håkan Johansson

Institutionen för Fundamental fysik  
Avdelningen för Subatomär fysik  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
GÖTEBORGS UNIVERSITET  
Göteborg, Sverige 2012  
Kandidatarbete FUFX02-12-02

## **Sammanfattning**

Crystal Ball är en detektor som kan användas för detektion av högenergetiska protoner, men denna uppgift kräver en potentiellt krävande och dyr kalibrering. I denna studie övervägdes en testuppställning med en NaI-kristall från Crystal Ball för att undersöka möjligheten att använda kosmiska myoner för kalibreringen av Crystal Ball. Studien genomfördes genom att simulera processen med hjälp av Geant4. Ett program skrevs för att simulera kosmiska myoner och protoner som passerar genom kristallen, samla in resultaten från dessa simuleringar och korrelera dem till varandra. En uppställning som kan användas för att finna korrelationen experimentiellt föreslås. Genom att använda resultaten från experimentet kan alla kristaller i Crystal Ball kalibreras med hjälp av kosmiska myoner.

# Innehåll

<b>1</b>	<b>Inledning</b>	<b>1</b>
1.1	Bakgrund . . . . .	1
1.2	Syfte och mål . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Teori</b>	<b>2</b>
2.1	Scintillatorer . . . . .	2
2.2	Minimalt joniserande partiklar . . . . .	2
2.3	Myoner . . . . .	3
2.4	Genomslag av partiklar . . . . .	3
<b>3</b>	<b>Metod</b>	<b>3</b>
3.1	Mjukvara . . . . .	3
3.2	Myonflöde . . . . .	4
3.3	Fördelning . . . . .	4
<b>4</b>	<b>Kalibrering</b>	<b>4</b>
4.1	Myonbeteende . . . . .	4
4.2	Protonbeteende . . . . .	6
<b>5</b>	<b>Resultat</b>	<b>8</b>
5.1	Horisontella scintillatorer . . . . .	8
5.2	Vertikala scintillatorer . . . . .	8
<b>6</b>	<b>Scintillatoruppställning</b>	<b>9</b>
	<b>References</b>	<b>10</b>

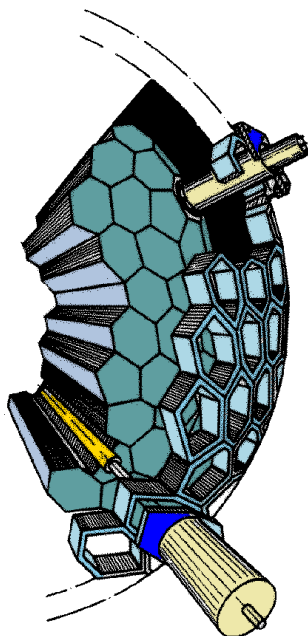
# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

Målet med forskning inom fältet för subatomär fysik är att få större förståelse för egenskaperna och strukturen hos atomkärnor. Detta görs genom experiment där resultaten från kollisioner mellan partiklar analyseras.

GSI i Darmstadt, Tyskland, är en av platserna där forskning bedrivs inom detta fält av fysiken. Forskningen utförs med utrustning innefattande partikelacceleratorer, detektorer med mera. En del av utrustningen, som detta fokuset för detta projekt, är Crystal Ball.

Crystal Ball är en detektoruppställning och fungerar som en  $4\pi$ -spektrometer och består av 162 NaI-kristaller som bildar en sfär med inre radie 25 cm och yttre radie 45 cm (se figur 1).



Figur 1: Skiss över Crystal Ball [1].

När ett experiment genomförs med Crystal Ball placeras ett mål i mitten av detektoruppställningen. Detta mål kan exempelvis vara plast, kol eller väte. En stråle med instabila partiklar, skapade från kärnreaktioner, kolliderar med målet. De flesta produkter från kollisionen kommer fortsätta i samma riktning som partikelstrålen, men vissa lättare partiklar kommer spridas i större vinklar. För att detektera dessa strålar, liksom fotoner, är det en  $4\pi$ -uppställning användbar.

Crystal Ball är från början optimerad för detektion av lågenergetiska  $\gamma$ -strålar (1 – 3 MeV), men används numera även för högenergetiska protoner (flera hundra MeV). För att kunna använda Crystal Ball för detektion av högenergetiska protoner krävs en tillbörlig kalibrering.

Eftersom det är både omständigt och dyrt att kalibrera alla kristaller en och en med hjälp av en protonstråle finns behovet av en alternativ källa med väldefinierat energispektrum samt vinkeldistribution som kan användas till kalibreringen. Denna källa hittas i kosmiska myoner.

Dessa partiklar produceras i atmosfären som ett resultat av de kaskadreaktioner som följer från interaktionen mellan kosmisk strålning och kärnpartiklar i atmosfären. Tack vare myoner är det tillräckligt att kalibrera en kristall från Crystal Ball med protonstrålen, genom att korrelera detta till energideponeringen i kristallen från kosmiska myoner. Detta kan göras eftersom myonernas energispektrum och vinkeldistribution är kända [12]. På så sätt kan de användas för att kalibrera övriga kristaller för detektion av högenergetiska protoner.

Eftersom myonernas energideposition beror på längden de färdas genom kristallen är det önskvärt att kunna spåra myonernas väg genom kristallen. I Crystal Ball aktiveras olika kristaller när en partikel passerar genom de, vilket möjliggör spårning. För den enskilda kristallen kommer det inte finnas några närliggande kristaller som kan fylla denna roll. Därför används plastscintillatorer, som är billiga och lätthanterliga, för att fylla denna funktion.

## 1.2 Syfte och mål

Målet med detta projekt var att utveckla ett sätt att kalibrera en kristall från Crystal Ball genom att använda kosmiska myoner. Detta gjordes genom att ta fram en lämplig detektoruppställning för kalibrering av kristallen mot protoner, som i sin tur används för korrelering mot myoner, genom Monte Carlo-simulationer.

Själva experimenten genomfördes inte inom detta projekt, utan målet var att ta fram simulationer och riktlinjer för kommande experiment.

## 2 Teori

### 2.1 Scintillatorer

En scintillator är ett material som deexciteras genom att avge ljus då atomer i det har exciterats genom joniserande strålning. Det finns en mängd olika typer av scintillatorer med olika egenskaper, men i detta projekt används plastscintillatorer samt NaI-kristaller (från Crystal Ball), som även innehåller en liten andel thallium (Tl). Plastscintillatorer används då de är billiga samtidigt som de är lätta att tillverka, forma och hantera.

För att få användning för en scintillator behöver man ansluta fotomultiplikationsrör (PMTs) till den. Denna ihopkopplade uppställning utgör en scintillationsräknare, som gör det möjligt att detektera scintillationer från partiklar, transformerade till elektriska signaler av viss amplitud.

### 2.2 Minimalt joniserande partiklar

För myoner med energi mellan cirka 100 keV-100 GeV beskrivs den deponerade energin i kristallen av Bethe-Bloch-formeln. Vid energier över 100 GeV kommer radioaktiva processer bli den huvudsakliga faktorn för att bestämma deponerad energi, i motsats till jonisering. I det område som beskrivs av Bethe-Bloch-formeln finns en punkt där den deponerade energin per längdenhet når ett minimum. Vid energier kring denna punkt kan myoner betraktas som en minimalt joniserande partikel och den deponerade energin kommer här vara väldigt svagt beroende av myonens energi. Kosmiska myoner har energier väl inom den region där de kan betraktas som minimalt joniserande partiklar [9].

## 2.3 Myoner

En myon är en instabil sumatomär partikel med samma laddning som en elektron och massan  $105.7 \text{ MeV}/c^2$ , vilket motsvarar 206.8 gånger massan av en elektron [7]. Kosmiska myoner bildas i den övre delen av atmosfären, och dess momentum tenderar att vara i samma riktning som de kosmiska strålning från vilka de bildas.

Intensiteten av inkommande myoner vid havsnivå beror på infallsvinkeln enligt ekvation (1), där  $p_\mu$  är myonmomentumet i  $\text{GeV}/c$ ,  $I(0)$  är den vertikala intensiteten och  $\theta$  är infallsvinkeln mot zenit [13]. Ekvation (2) används för att bestämma parametrarna  $a$ ,  $b$  och  $c$ , med hjälp av data från Tabell 1. Dessa relationer beskriver de uppmätta intensiteterna väl för myoner med energier mellan 0.2-100  $\text{GeV}/c$  [13], vilket ligger motsvarar den region där myoner kan betraktas som minimalt joniserande partiklar [9].

$$\log(I(\theta)) = a \ln^2 p_\mu + b \ln p_\mu + c \quad (1)$$

$$Y = p_1/(1/\theta + p_2\theta) + p_3 + p_4 \exp(-p_5\theta) \quad (2)$$

	a	b	c
$p_1$	$-0.8816 * 10^{-4}$	$+0.4169 * 10^{-2}$	$-0.3516 * 10^{-3}$
$p_2$	$-0.1117 * 10^{-3}$	$-0.9891 * 10^{-4}$	$+0.8861 * 10^{-2}$
$p_3$	-0.1096	+4.0395	-2.5985
$p_4$	$-0.1966 * 10^{-1}$	-4.3118	$-0.8745 * 10^{-5}$
$p_5$	$+0.2040 * 10^{-1}$	$-0.9235 * 10^{-3}$	-0.1457

Tabell 1: Parametrar för ekvationerna (1) och (2) [12].

## 2.4 Genomslag av partiklar

Kristallerna i Crystal Ball är från början inte designade för detektion av högenergetiska protoner och är inte tillräckligt långa för att helt stoppa alla protoner under deras färd genom kristallen.

Genomslag beskriver det fall då en partikel som färdas genom materialet endast deponerar en del av sin kinetiska energi, vilket resulterar i att den ‘slår igenom’ materialet. Den motsatta processen är total förlust av kinetisk energi, vilket resulterar i att partikeln stannas upp helt i materialet. Genomslagsenergin för en kristall vid en viss längd är den energi som krävs för att partikeln ska “slå igenom” kristallen.

# 3 Metod

## 3.1 Mjukvara

Simuleringarna i studien utfördes med version 9.4 av Geant4, som är en objektorienterat utvecklingsram utvecklad vid CERN-laboratorierna för ‘simuleringar av genomströmningen av partiklar genom materia’. Geant4 utvecklades för att göra exakta simuleringar av partikeldetektorer, men

har många andra applikationer inom exempelvis medicin och astrofysik [2]. Geant4 tillåter användaren att definiera detektorns geometri med olika material och simulera partiklar samtidigt som man kan följa deras interaktioner med detektorn genom en mängd olika fysikaliska processer.

### 3.2 Myonflöde

Då tiden som finns tillgänglig för kalibreringsmätningar är begränsad behöver en uppskattning av myonflödet genom de olika scintillatorkonfigureringarna göras. En viss uppställning kan ge en väldefinierad längd genom kristallen, men om antalet myoner som passerar genom denna konfiguration inte är tillräckligt högt skulle alltför mycket tid krävas för att få ett säkert statistiskt underlag. En enkel uppställning med två kvadratiska scintillatorer med sidlängd 5 cm på avståndet 41 cm från varandra i horisontell led ger ett beräknat myonflöde på  $0.0026 \text{ s}^{-1}$ , vilket betyder att en myon passerar båda detektorerna var 383:e sekund.

### 3.3 Fördelning

För att få en uniform distribution av myoner mot kristallen konstruerades en modifierad halvsfär runt kristallen. En positionsvektor,  $\vec{v}_p$ , på halvsfären slumpades fram genom uniformt randomiserade värden på  $\theta$  och  $\phi$  i sfäriska koordinater.

En förskjutningsvektor,  $\vec{v}_o$ , vinkelrät mot positionsvektorn erhöles genom derivation av positionsvektorn med avseende på  $\theta$ .  $\frac{\delta \vec{v}_p}{\delta \theta}$  användes eftersom  $\frac{\delta \vec{v}_p}{\delta \phi}$  är nollvärd då  $\theta = 0$ , och därför inte skulle ge en uniform distribution.

Den erhållna förskjutningsvektorn roterades med en randomiserad vinkel  $\alpha$  kring positionsvektorn och dess storlek,  $r$ , bestämdes till positionsvektorns storlek multiplicerat med kvadratroten av en randomiserad skalär mellan noll och ett. Detta gjordes för att ge lika stor sannolikhet för varje punkt på en tilltänkt disk på halvsfären.

Myonens startposition sattes till  $\vec{v} = \vec{v}_p + \vec{v}_o$  (se figur 2) och momentumets riktning sattes till  $-\vec{v}_p$ .

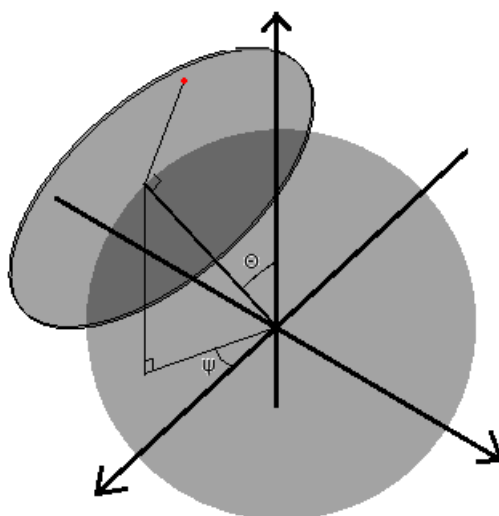
Fördelningen, given av ekvation (1) implementerades sedan i sfären, vilket gav den korrekta distributionen för simuleringar.

## 4 Kalibrering

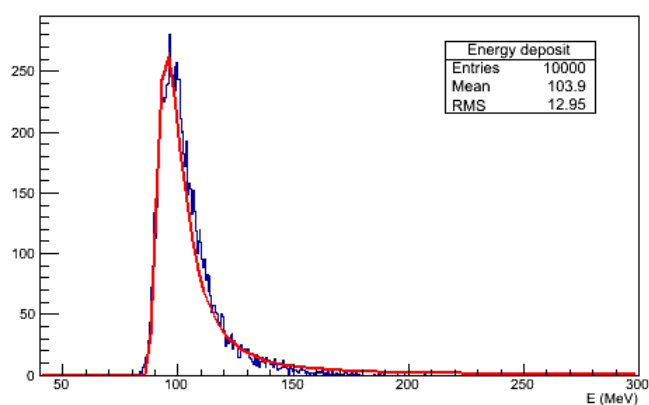
Alla dessa simuleringar genomfördes med en cylindrisk NaI-kristall med radie 10 cm. Cylinderns längd varierades mellan 5 cm, 10 cm, 15 cm och 20 cm. Samtliga simuleringar gjordes med 10 000 partiklar, som sköts vinkelrätt mot cylinderns toppyta.

### 4.1 Myonbeteende

Genom att skicka monoenergetiska myoner mot cylindrar av fix längd går det att hitta systematik i den deponerade energin genom att variera dessa parametrar. Spektrat för den deponerade energin anpassas med en Landau-fördelning. Anpassningen inkluderar tre parametrar varav en är extra intressant, nämligen det mest sannolika värdet (MPV).



Figur 2: Skiss av den modifierade halvsfären.



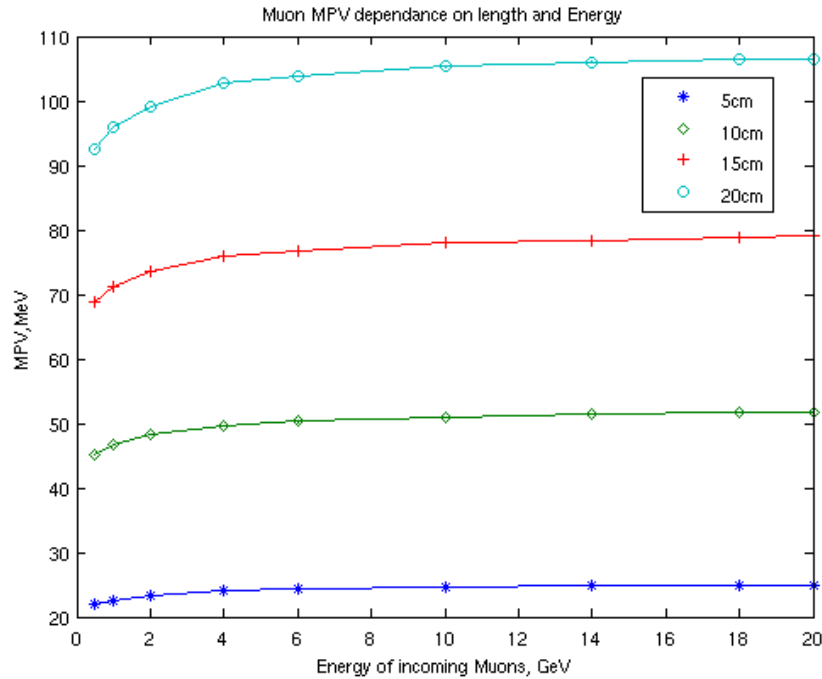
Figur 3: En Landau-fördelning anpassad till data motsvarande den deponerade energin för monoenergetiska myoner skickade mot en NaI-cylinder av längd 20 cm. Myonernas energi är 1.0 GeV och de skickas genom cylinderns centrum.

Genom att samla informationen för olika längd genom kristallen går det att finna en relation mellan de två. Simuleringar med myoner av olika energi genomfördes och det visade sig att det råder ett linjärt samband mellan längden myonerna färdas genom kristallen och den deponerade energin i kristallen.

För att finna energideponeringens beroende av myonernas initiala energi varierades myonernas energi från 0.5 GeV till 20 GeV, medan kristallens längd hölls konstant vid olika värden.

Av figur 4 går att utläsa att den deponerade energin är väldigt svagt beroende på myonernas initiala energi. Detta resultat är i allra högsta grad förväntat då myonerna i den simulerade





Figur 4: MPV för deponerad energi från simuleringar där myonernas initiala energi varierades. Data för flera olika längder på kristallen.

regionen kan betraktas som minimalt joniserade partiklar.

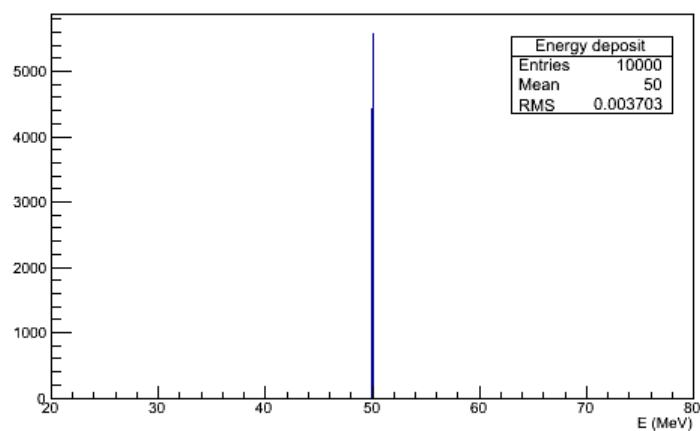
Det existerar yteffekter, vilket betyder att den deponerade energin beror på hur nära kristallens kanter myonerna passerar. Denna effekt spelar dock endast en roll då avståndet till kanten är mindre än 1 cm.

## 4.2 Protonbeteende

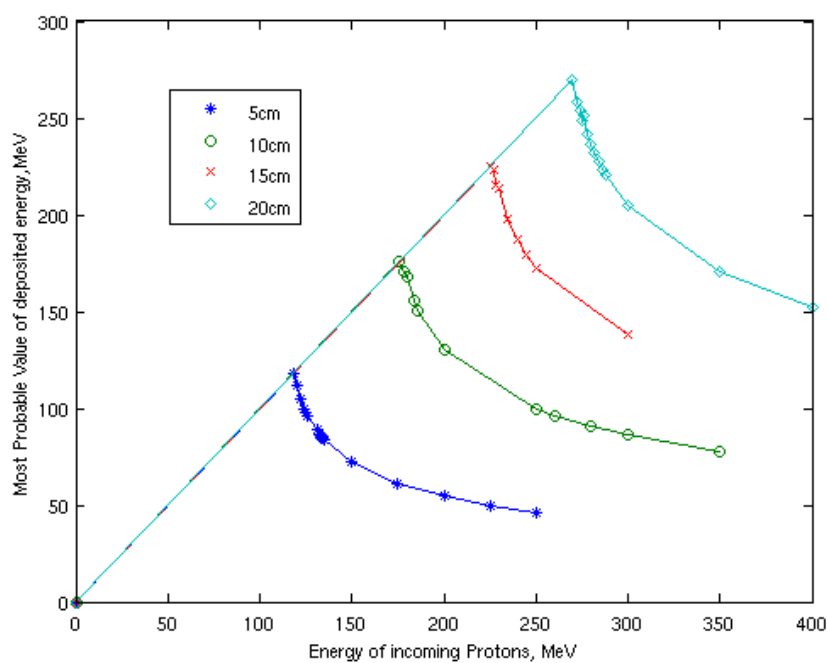
Protoner är till skillnad från myoner inte minimalt joniserande partiklar i det intressanta energi-intervallet. Därför kan energideponeringen för protoner inte förväntas bete sig likt energiförlusten från myoner.

Histogrammen från protonsimuleringar anpassades mer fördelaktigt med en Gaussian-fördelning, snarare än en Landau-fördelning som var mer lämpligt för myoner. För energier under genomslagsenergin gjordes ingen funktionsanpassning, då protonerna här ger upphov till en väldefinierad topp (all energi deponeras).

För tillräckligt höga energier kommer protoner inte slå genom cylindern på samma sätt som myonerna gör. För att undersöka detta beteende skickades protoner av olika energier genom cylindrar av olika längd, varpå resultaten plottades i figur 6.



Figur 5: Den deponerade energin från protoner med kinetiska energin 50 MeV i en 10 cm lång NaI-kristall.



Figur 6: MPV från simuleringar där protoner med olika kinetisk energi skickas genom NaI-kristaller av olika längd. De olinjära delarna motsvarar energier större än genomslagsenergin.

## 5 Resultat

### 5.1 Horisontella scintillatorer

sida [cm]	$n$	MPV( $\sigma$ ) [MeV]	träffar/ $10^6$
5.5	1121	102.74(5.09)	22.4
9.5	1861	103.04(4.88)	62.0
13.5	11079	102.57(4.67)	123.1
17.5	10020	102.54(4.71)	200.4

Tabell 2: Resultat from simuleringar av horisontala myoner för scintillatorer med olika sidlängd.  $n$  är antalet registrerade partiklar, MPV och  $\sigma$  är 'mest sannolika värdet' samt dess motsvarande osäkerhet från Landau-anpassningen till data. Träffar/ $10^6$  är antalet myoner som passerade genom båda scintillatorerna per en miljon simulerade myoner.

separation [cm]	$n$	MPV( $\sigma$ ) [MeV]	träffar/ $10^6$
42	1330	102.42(4.70)	14.8
47	932	102.50(5.17)	11.7
52	732	102.02(4.98)	9.0
57	427	102.92(5.14)	7.12

Tabell 3: Resultat from simuleringar av horisontala myoner för olika scintillatorer separationer.  $n$  är antalet registrerade partiklar, MPV och  $\sigma$  är 'mest sannolika värdet' samt dess motsvarande osäkerhet från Landau-anpassningen till data. Träffar/ $10^6$  är antalet myoner som passerade genom båda scintillatorerna per en miljon simulerade myoner.

### 5.2 Vertikala scintillatorer

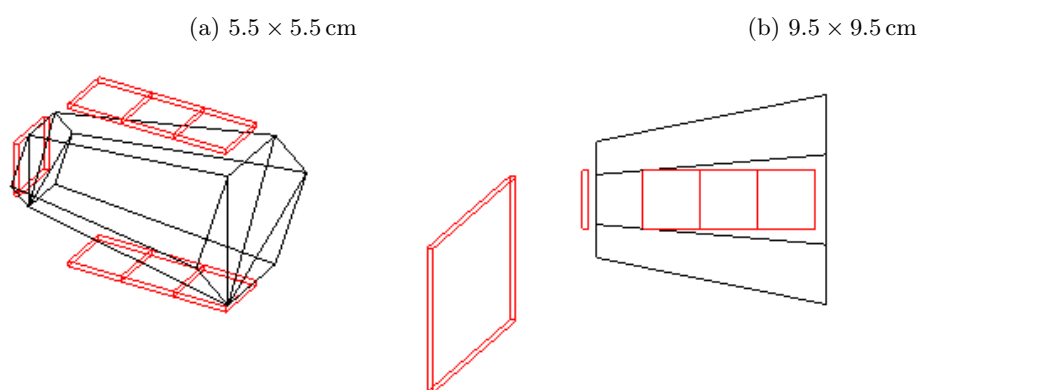
Size	$n$	$\sigma_{\min}$	$\sigma_{\text{mean}}$	$\sigma_{\max}$
$10 \times 20$ cm	1	4.13	4.13	4.13
$10 \times 10$ cm	2	2.49	2.71	2.93
$6.67 \times 6.67$ cm	3	1.96	2.41	2.72
$5 \times 5$ cm	4	2.01	2.46	2.83
$4 \times 4$ cm	5	1.91	2.39	2.87
$3.33 \times 3.33$ cm	6	1.89	2.30	2.56
$2.86 \times 2.86$ cm	7	1.78	2.40	2.83
$2.5 \times 2.5$ cm	8	1.76	2.40	2.94

Tabell 4: Resultat från simuleringar av vertikala scintillatoruppställningen. Data presenteras som scintillatorstorlekar, antal kristaller i en scintillatoruppställning tillsammans med minimum-, medel- and maxvärden för  $\sigma$  från Landau-anpassningen till data.

## 6 Scintillatoruppställning

Flaskhalsen i mätningarna med myoner är det horisontella myonflödet genom kristallens längd, givet att kristallen skall ligga horisontalt under datainsamlingen samt att kalibrationen inte bör ta mer än tre dagar.

Simuleringarna visade att det är önskvärt att maximera de horisontella scintillatorernas area, samtidigt som man måste se till att myonerna som passerar båda scintillatorer går genom kristallens hela längd. Med tanke på platsen som reserverats för en PMT på kristallens baksida föreslås två kvadratiska scintillatorer -  $5 \times 5$  cm och  $13.7 \times 13.7$  cm, se figur 7.



Figur 7: Scintillatorsuppställning för att maximera horisontellt muonflöde, undvika yteffekter, och samla tillförlitlig data med plastscintillatorer.

Det visade sig också att minskning av de kvadratiska scintillatorerna bortom  $5 \times 5$  cm inte gav någon stor förbättring av avvikelsen i mätningarna, så det föreslås att scintillatorer av denna storlek används. För att minimera yteffekter bör scintillatorerna placeras minst 1 cm från kanter. Med detta i åtanke föreslås en uppställning med tre par scintillatorer av storlek  $5 \times 5$  cm placerade vertikalt över varandra, 1 cm från den tjockare änden av kristallen. Placering över den tjockare änden minimerar den relativa skillnaden mellan den längsta och kortaste möjliga vägen genom kristallen för myonerna.

## Referenser

- [1] Adrich, P. (2003) *The Crystal Ball  $\gamma$ -Detector Setup and Calibration*. Retrieved 8 February, 2012, from GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH.  
[http://www.gsi.de/forschung/kp/kp2/collaborations/land/doc/detectors/crystal\\_ball/cb\\_docu.pdf](http://www.gsi.de/forschung/kp/kp2/collaborations/land/doc/detectors/crystal_ball/cb_docu.pdf)
  
- [2] Geant4 collaboration, Agostinelli, S. et al. (2003). Geant 4 - a simulation toolkit, *Nuclear Instrument and Methods in Physics Research A*, vol. 506, pp. 250-303.
  
- [3] Geant4 collaboration, Allison, J. et al. (2006). Geant4 developments and applications, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 53, pp. 270-278.
  
- [4] Amako, K. et al. (2005). Comparison of Geant4 electromagnetic physics models against the NIST reference data, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 52, pp. 910-918.
  
- [5] Cirrone, G.A.P. et al. (2004). Precision validation of Geant4 electromagnetic physics, *i Conf. Rec. 2003 IEEE Nuclear Science Symposium*, vol. N23-2.
  
- [6] Leo, W. R., (1994) *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*. Second revised edition. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
  
- [7] Devons, s et al. (1960). *Muon Mass and Charge by Critical Absorption of Mesonic X Rays*. Retrieved 15 May, 2012, from Columbia University.  
[http://prl.aps.org/pdf/PRL/v5/i7/p330\\_1](http://prl.aps.org/pdf/PRL/v5/i7/p330_1)
  
- [8] Green, D. (2000). Ionization. In *The Physics of Particle Detectors*, red. D. Green, ss. 107-108. Cambridge: Cambridge University Press.
  
- [9] Groom, D E. Klein, S R. (1999). *Passage of particles through matter*. Retrieved 10 May, 2012, from Lawrence Berkeley National Laboratory.  
<http://www.springerlink.com/content/m321677145684107/fulltext.pdf>
  
- [10] Groom, D E. Mokhov, N V. Striganov, S I. (2001) Muon Stopping Power and Range Tables 10 MeV-100 MeV. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, vol. 76, nr 2, pp. 183-356.  
<http://pdg.lbl.gov/2008/AtomicNuclearProperties/adndt.pdf>

- [11] Private communication with Heinz, A. M. 15 May, 2012, from Chalmers University of Technology.
- [12] Kempa, J. Brancus, M. (2003). Zenith angle distributions of cosmic ray muons. *Nuclear Physics B (Proc. Suppl.)*, vol. 122, pp. 279-281.
- [13] Kempa, J. Krawczynska, A. (2006). *Low energy muons in the cosmic radiation*. Retrieved 13 Mars, 2012, from Warsaw University of Technology.
- [14] Liu, L. (2007). *The Speed and Lifetime of Cosmic Ray Muons*. Retrieved 15 May, 2012, from Massachusetts Institute of Technology.  
<http://web.mit.edu/lululiu/Public/pixx/not-pixx/muons.pdf>
- [15] National University of La Plata. (n. d.). *Muon basics*. Retrieved 8 February, 2012, from National University of La Plata.  
<http://www.fisica.unlp.edu.ar/~veiga/experiments.html>
- [16] Nilsson, T. (2011). *ROOT analysis, simple simulation and curve fitting write-up for the course "FUF065/FIM465 Advanced Subatomic Detection and Analysis Methods"*. Retrieved 9 February, 2012, from Chalmers University of Technology.  
[http://fy.chalmers.se/subatom/advsubdet/ROOT\\_small.pdf](http://fy.chalmers.se/subatom/advsubdet/ROOT_small.pdf)
- [17] Official website of the Geant4 collaboration. (n. d.). *Geant4: A toolkit for the simulation of the passage of particles through matter*. Retrieved 9 February, 2012, from  
<http://geant4.org/>
- [18] *ROOT*, Retrieved 15 May, 2012, from <http://root.cern.ch/>
- [19] Saint-Gobain Ceramics & Plastics Inc. (2005). *BC-400, BC-404, BC-408, BC-412, BC-416 Premium Plastic Scintillators Datasheet*.
- [20] Wamers, F. (2011). *Quasi-Free-Scattering and One-Proton-Removal Reactions with the Proton-Dripline Nucleus  $^{17}\text{Ne}$  at Relativistic Beam Energies*, Technische Universität Darmstadt, pp. 31-32.