

UNIVERZA V LJUBLJANI  
FAKULTETA ZA MATEMATIKO IN FIZIKO  
ODDELEK ZA FIZIKO

**Umeritev optičnega sistema detektorja Čerenkovih  
obročev v spektrometru HERA-B**

Andrej Gorišek

MENTOR: prof. dr. Peter Križan

Delo je pripravljeno po razpisu odbora za Prešernove nagrade študentov za  
leto 1997, pod mentorstvom prof. dr. Petra Križana.

Ljubljana, 1997



Najprej se želim zahvaliti svojemu mentorju prof. dr. Petru Križanu, ki je vedno našel čas za pogovor o kateremkoli problemu pri mojem diplomskem delu. Besedilo je večkrat pazljivo prebral in me opozarjal na napake in pomanjkljivosti.

Pri pisanju so mi bili v veliko pomoč prijazni nasveti in kritične pripombe prof. dr. Aleša Stanovnika, dr. Marka Stariča, dr. Sama Korparja in mag. Damjana Škrka.

Vsem sodelavcem Oddelka za eksperimentalno fiziko delcev (F9) Instituta Jožef Stefan se zahvaljujem za izredno delovno okolje, ki mi je bilo v veliko spodbudo. Vsa zahvala gre tudi mojim najbližjim, ki so mi ves čas študija, še posebno pa zadnje mesece, stali ob strani.



## Povzetek

V diplomskem delu je opisana metoda, s katero je moč umeriti optični sistem, sestavljen iz dveh zrcal, ki sta obe razdeljeni na dele. Metoda, ki sem jo razvil, bo uporabljena za umeritev optičnega sistema detektorja Čerenkovih obročev v spektrometru HERA-B. Metodo sem preizkusil s simuliranimi podatki. Pokazal sem, da lahko napako zaradi optičnega sistema v določitvi Čerenkovega kota zmanjšamo znatno pod velikost ostalih prispevkov z uporabo izmerjenih podatkov.

Ključne besede: eksperimentalna fizika osnovnih delcev, detektorji osnovnih delcev, Čerenkovo sevanje, spektrometer HERA-B, števec Čerenkovih obročev.

## Abstract

A method is presented for the alignment of the optical system comprised of two separate mirrors, which are both segmented. The method will be used for the alignment of the optical system mirror segments in the RICH of HERA-B spectrometer. The method was tested by using simulated events. The study shows that the mirror segments can be aligned accurately enough to make the corresponding error in the Cherenkov angle negligible.

Key words: elementary particles - experiments, elementary particles - detectors, Cherenkov radiation, spectrometer HERA-B, ring imaging Cherenkov counter.

### PACS:

29.40.Ka

02.70.+d



# Kazalo

<b>Uvod</b>	<b>9</b>
<b>1 Eksperiment HERA-B</b>	<b>11</b>
1.1 Namen eksperimenta . . . . .	11
1.2 Detektor Čerenkovih obročev . . . . .	12
1.2.1 Čerenkovo sevanje . . . . .	12
1.3 Število fotonov . . . . .	15
1.4 Sledilni sistem . . . . .	17
<b>2 Ločljivost</b>	<b>19</b>
<b>3 Optični sistem</b>	<b>23</b>
3.1 Krogelno zrcalo . . . . .	23
3.2 Ravno zrcalo . . . . .	26
<b>4 Umeritev optičnega sistema</b>	<b>27</b>
4.1 Optični sistem z enim krogelnim zrcalom . . . . .	30
4.2 Enolični fotoni . . . . .	31
4.3 Splošni primer . . . . .	33
<b>5 Računalniška simulacija</b>	<b>39</b>
<b>6 Rezultati</b>	<b>41</b>
6.1 Izotropna porazdelitev . . . . .	41
6.1.1 Iterativna metoda . . . . .	44
6.2 Realistična porazdelitev nabitih delcev . . . . .	52
6.3 Umeritev pri velikem ozadju . . . . .	59
6.4 Napaka v meritvi Čerenkovega kota . . . . .	66

7 **Zaključek**

67

**Literatura**

69



# Uvod

Zrcala, ki so sestavni del optičnega sistema detektorja Čerenkovih obročev (RICH) v spektrometru HERA-B, so sestavljena iz neodvisno gibljivih delov. K skupni napaki pri meritvi Čerenkovega kota lahko pomembno prispeva napaka zaradi nepravilne nastavitve posameznih delov zrcal.

Namen tega diplomskega dela je bil razviti in preizkusiti metodo, s katero je mogoče zmanjšati ta prispevek k napaki občutno pod velikost vsote vseh ostalih prispevkov k napaki. To je moč doseči z uporabo izmerjenih podatkov, ne da bi zato posebej prekinjali meritev. Metodo sem preizkusil z računalniško simulacijo.

V prvem poglavju sem na kratko opisal poskus HERA-B v institutu DESY v Hamburgu, predvsem dele detektorja, ki so pomembni za umeritev optičnega sistema detektorja Čerenkovih obročev: sledilne komore in sam detektor Čerenkovih obročev. Sledi opis posameznih prispevkov k napaki meritve in njihova ocena. V naslednjem poglavju sem opisal sestavne dele optičnega sistema detektorja Čerenkovih obročev spektrometra HERA-B. Četrto, peto in šesto poglavje predstavljajo jedro diplomskega dela. V njih sem opisal metodo, s katero sem poskušal umeriti posamezne dele zrcal (četrto poglavje) in računalniško simulacijo, s katero sem se poskušal čimbolj približati dejanskemu stanju detektorja med potekom poskusa (peto poglavje). V šestem poglavju sem opisal rezultate pri umeritvi sistema zrcal, ki je sestavljen iz krogelnega zrcala z 38 neodvisno gibljivimi šestkotnimi deli, ter ravnega zrcala iz šestih pravokotnih delov.



# 1. poglavje

## Eksperiment HERA-B

### 1.1 Namen eksperimenta

V Hamburgu je v institutu DESY (Deutsches Elektronen SYNchrotron) postavljen trkalnik HERA, kjer v nasprotnih smereh po obroču krožijo elektroni z energijami 30GeV in protoni z energijami 820GeV. Spektrometer HERA-B (slika 1.1, [1, 2]) je le eden izmed eksperimentov, postavljenih ob ta obroč. Izkorišča samo protonski žarek, ki se siplje na mirujoči žični tarči. Tarča je postavljena na rob žarka in tako ne moti poteka ostalih poskusov ob trkalniku HERA.

Načrtovalci eksperimenta HERA-B si obetajo izmeriti kršitev simetrije CP pri sistemu mezonov  $B$ , ki se kaže kot asimetrija v razpadu nevtralnih mezonov  $B$ . Eden izmed razpadnih kanalov nevtralnih mezonov  $B$  je tudi:

$$\overset{(-)}{B^0} \rightarrow J/\psi K_S^0, \quad (1.1)$$

Spremljamo samo razpadni kanal, pri katerem  $J/\psi$  in  $K_S^0$  razpadeta na dva leptona ( $e^+e^-$  ali  $\mu^+\mu^-$ ) in dva piona:

$$\begin{aligned} J/\psi &\rightarrow l^+l^-, \\ K_S^0 &\rightarrow \pi^+\pi^-, \end{aligned} \quad (1.2)$$

$K_S^0$  predstavlja samo tisto komponento, ki razpade v dva piona ( $K_1$ ), ki je lastno stanje simetrije CP z lastno vrednostjo  $CP = +1$ .

Oba nevtralna mezona  $B$ ,  $B^0$  in  $\bar{B}^0$ , razpadeta po istem kanalu. Razlika je v ostalih produktih, ki spremljajo razpad nevtralnega mezona  $B$ .  $B^0$  ( $\bar{B}^0$ ) vsebuje

kvark  $\bar{b}$  ( $b$ ). Ker kvarka  $b$  in  $\bar{b}$  vedno nastaneta v paru, pri razpadu  $B^0$  v kanal 1.2 lahko dobimo med spremljajočimi produkti tudi  $K^-$  (če razpade hadron, ki vsebuje kvark  $b$ ), pri razpadu  $\bar{B}^0$  pa  $K^+$  (če razpade hadron, ki vsebuje kvark  $\bar{b}$ ). Neenako število  $K^-$  in  $K^+$  med spremljajočimi produkti nevtralnih mezonov  $B$  bi kazalo na kršitev simetrije CP.

## 1.2 Detektor Čerenkovih obročev

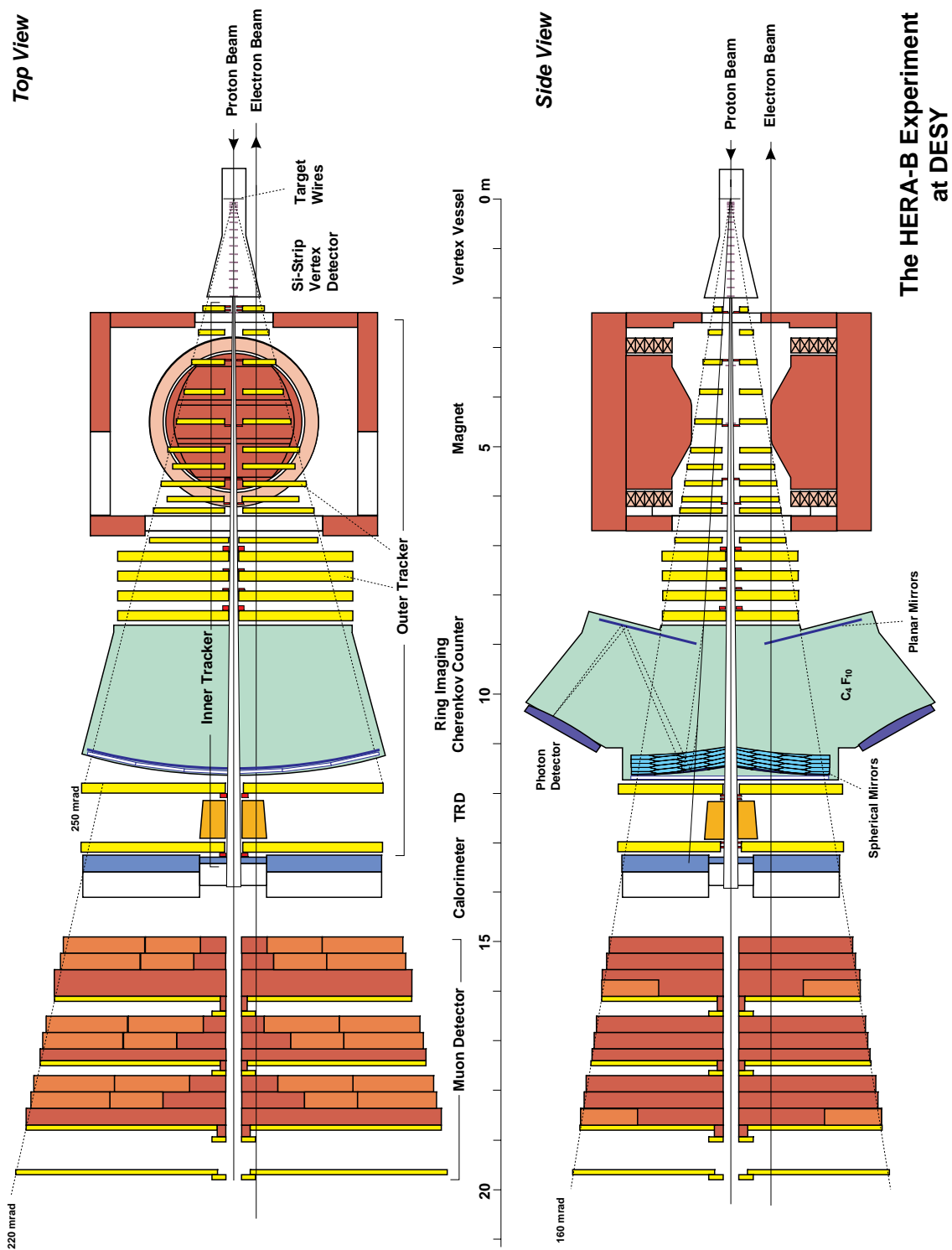
Naloga detektorja Čerenkovih obročev v spektrometru HERA-B je ločevanje kaonov od pionov in protonov na širokem intervalu gibalnih količin (od  $3 \text{ GeV}/c$  do  $50 \text{ GeV}/c$ ).

Sestavni del detektorja je velika posoda, ki je napolnjena s sevalcem, plinom dekafluoro butanom  $C_4F_{10}$ , z lomnim kvocientom  $n = 1.00151$  [3]. V tej posodi sta še dva sistema zrcal: dve krogelni zrcali, ki preslikata snop Čerenkovih fotonov v obroč na goriščni ravnini, ter dve ravni zrcali, ki fotone usmerita na površino fotonskega detektorja (slika 1.2). Fotonski detektor je od posode s sevalcem ločen z oknom iz pleksi stekla. Fotone zaznavamo z mrežo večanodnih fotopomnoževalk. Vsaka fotopomnoževalka ima občutljivo površino razdeljeno na šestnajst ( $4 \times 4$ ) delov.

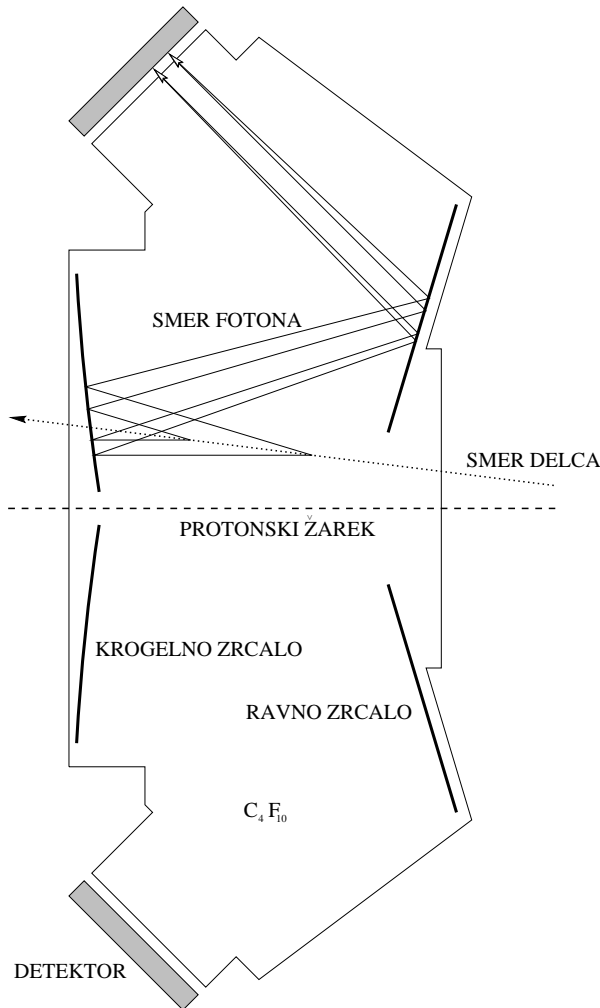
### 1.2.1 Čerenkovo sevanje

Delci se lahko gibljejo v sredstvu z lomnim kvocientom večjim od 1 ( $n > 1$ ) s hitrostjo, ki je večja od svetlobne hitrosti v tem sredstvu ( $c/n$ ). Ob preletu nabitega delca se molekule polarizirajo in orientirajo k delcu s tistimi deli, ki so nasprotno nabiti kot delec. Polarizirane molekule ob polarizaciji in depolarizaciji sevajo kot električni dipoli [4].

Delci, ki so hitrejši od svetlobe, povzročijo valovno čelo. Nastanek valovnega čela lahko razložimo s Huygensovimi principom (glej sliko 1.3). Delec potuje

The HERA-B Experiment  
at DESY

Slika 1.1: Spektrometer HERA-B v vodoravnem (levo) in navpičnem pre-rezu (desno).

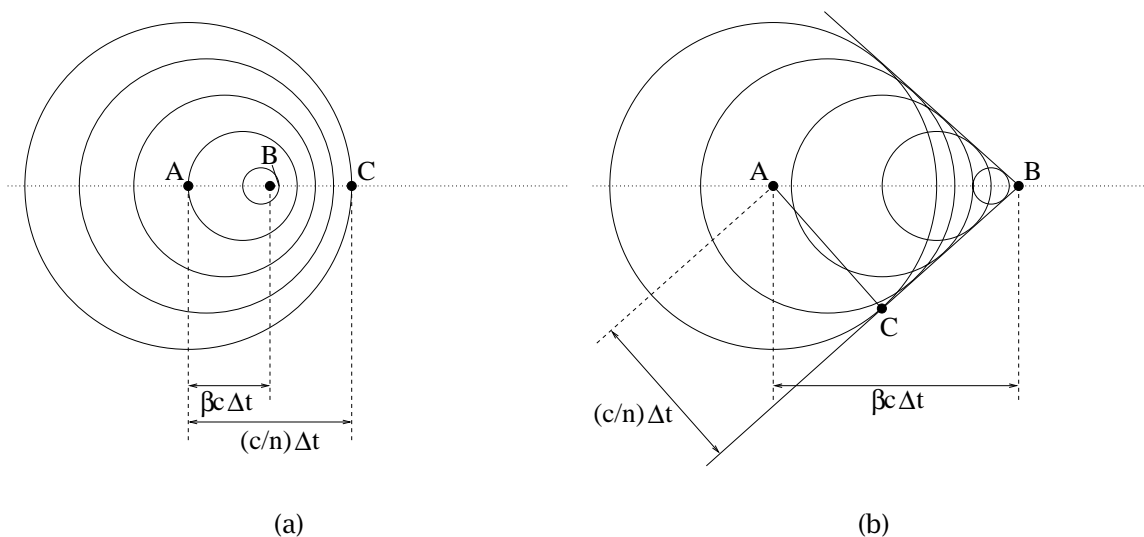


**Slika 1.2:** Shematični prikaz detektorja Čerenkovih obročev spektrometra HERA-B.

s hitrostjo  $v = \beta c$ , svetloba pa se v sredstvu širi s hitrostjo  $c/n$ , kjer je  $c$  hitrost svetlobe v vakumu. Delec potrebuje za pot iz točke A v točko B čas  $\Delta t = AB/(\beta c)$ . V istem času prepotuje svetloba pot od točke A do točke C:  $\Delta t = AC/(c/n)$ . Kot  $\vartheta$  na sliki 1.3 izračunamo iz hitrosti delca in lomnega kvocienta sredstva [4]:

$$\cos \vartheta = \frac{(c/n)}{\beta c} = \frac{1}{\beta n} \quad (1.3)$$

Delci morajo imeti hitrosti višje kot  $(1/n)c$ , da sevajo Čerenkove fotone. Največji kot, pod katerim delci sevajo Čerenkove fotone, dobimo, če v enačbo 1.3 vstavimo vrednost  $\beta = 1$ , tako da je  $\vartheta_{max} = \arccos(1/n)$ . Plin  $C_4F_{10}$  ima pri



**Slika 1.3:** Delec, ki je počasnejši od hitrosti svetlobe v snovi, ne seva (a). Če pa se delec giblje hitreje kot svetloba, dobimo valvno čelo in delec seva.

energiji fotonov okoli 7 eV lomni kvocient  $n = 1.00151$  [3]. Pri teh energijah fotonov zelo hitri delci sevajo Čerenkove fotone pod kotom  $\vartheta_{max} = 55 \text{ mrad}$ .

## 1.3 Število fotonov

Število fotonov, ki jih izseva nabiti delec ob preletu sevalca, je odvisno od energije Čerenkovih fotonov. Za število fotonov na energijski interval velja relacija [4, 6]:

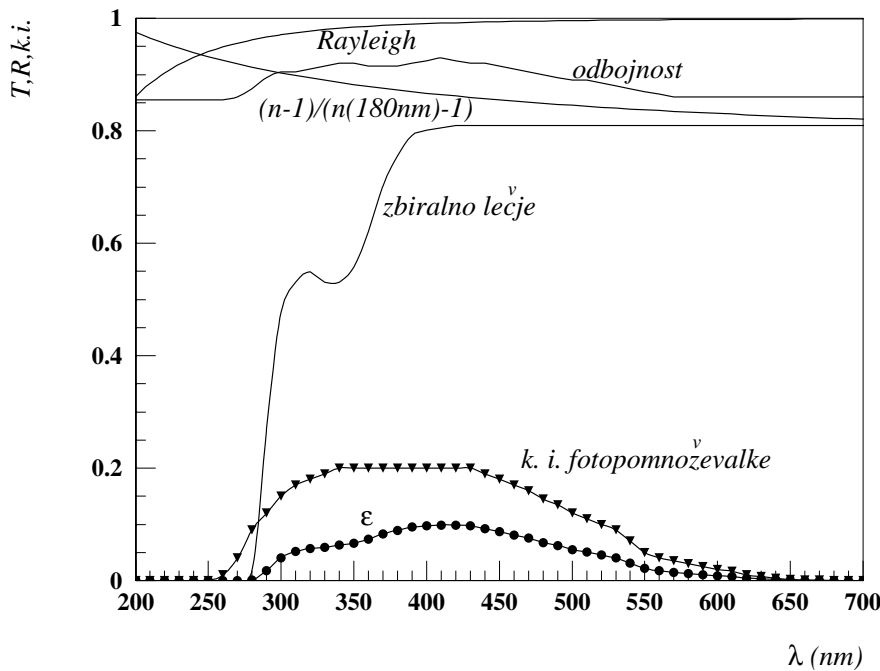
$$\frac{dN_y}{dE} = \frac{\alpha}{\hbar c} L \sin^2 \vartheta, \quad (1.4)$$

kjer je  $\alpha = e^2/4\pi\epsilon_0\hbar c = 1/137$  konstanta fine strukture,  $L$  pa dolžina sevalca. Če upoštevamo še zvezo za kot Čerenkovega sevanja (enačba 1.3), dobimo namesto enačbe 1.4 naslednji izraz [4]:

$$\frac{dN_y}{dE} = \frac{\alpha}{\hbar c} L \left(1 - \frac{1}{(\beta n)^2}\right), \quad (1.5)$$

Ob upoštevanju verjetnosti, s katero izsevani foton zaznamo na detektorju ( $\epsilon$ ), ki je produkt kvantnega izkoristka fotopomnoževalk, propustnosti lečja, odbojnosti zrcal in propustnosti sevalca (glej sliko 1.4), dobim naslednjo zvezo za število fotonov, zaznanih na detektorju, na nabiti delec, ki preleti sevalec:

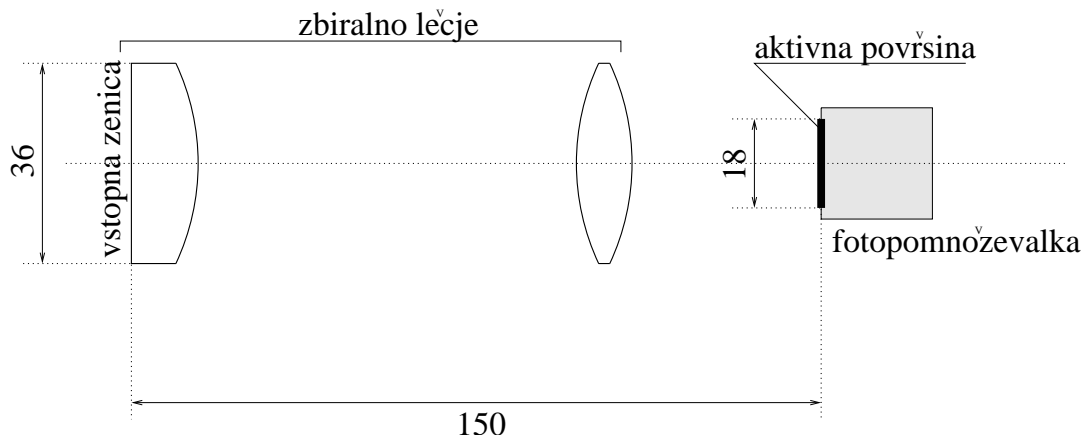
$$N_y = \frac{\alpha}{\hbar c} L \int \left( 1 - \frac{1}{(\beta n(E))^2} \right) \epsilon(E) dE, \quad (1.6)$$



**Slika 1.4:** Kvantni izkoristek fotopomnoževalke, odbojnost, propustnost zbiralnega lečja (slika 1.5), sipalne izgube in odvisnost lomnega kvocienta od valovne dolžine [7, 8]. Spodnja krivulja je enaka verjetnosti, da zaznamo izsevani foton na fotonem detektorju  $\epsilon$ .

Dolžina poti delca v sevalcu  $L$  je v spektrometru HERA-B približno 2.5 m. Če privzamem, da je hitrost delcev enaka svetlobni, lahko integral iz enačbe 1.6 ocenimo kar iz slike 1.4. V tem primeru dobim, da je število Čerenkovih fotonov v obroču na detektorju porazdeljeno okoli  $N_y \approx 40$ . V računalniški simulaciji sem zaradi varnosti (še kakšne dodatne izgube, ki jih nismo upoštevali) generiral v povprečju 30 fotonov na delec, ki je preletel sevalec.





**Slika 1.5:** Shematični prikaz zbiralnega lečja. Njegova naloga je zbrati snop žarkov, ki padejo na vstopno zenico, na aktivni površini fotopomnoževalke.

## 1.4 Sledilni sistem

Za učinkovito meritev Čerenkovega kota je potrebno zelo natančno poznati smer delca. Smer delca določimo s sledilnim sistemom, ki je nameščen pred detektorjem Čerenkovih obročev, delno tudi v magnetnem polju magneta, in za detektorjem Čerenkovih obročev (slika 1.1). Sledilni sistem je sestavljen iz več delov. Pred detektorjem Čerenkovih obročev je blizu protonskega žarka notranji sledilni sistem, ki je prilagojen velikim pogostostim štetja. Sestavljajo ga mikropasovne plinske celice. Okrog njega je postavljen zunanji sledilni sistem, ki je narejen iz potovalnih komor. Napaka pri določitvi smeri delca je odvisna od gibalne količine, za visokoenergijske delce pa bo predvidoma znašala  $0.05 \text{ mrad}$  [1, 2].



## 2. poglavje

### Ločljivost

Napaka meritve Čerenkovega kota v detektorju Čerenkovih obročev je posledica vrste neodvisnih prispevkov. Nekatere lahko zmanjšamo, nekaterim pa se žal ne da izogniti. V tem poglavju bom naštel in opisal različne prispevke k napaki meritve in jih poskušal tudi oceniti. Cilj moje diplome je pokazati, da lahko umerim optični sistem detektorja Čerenkovih obročev veliko natančneje, kot pa je napaka meritve Čerenkovega kota zaradi drugih prispevkov.

Iz koordinate zadetka fotona na detektorju in iz smeri delca, ki jo določimo iz sledi, ki jo delec pusti v sledilnih komorah, lahko izračunamo Čerenkov kot in iz kota hitrost delca  $\beta$ ,

$$\beta = \frac{1}{n \cos(\vartheta)} \quad (2.1)$$

Najpomembnejši del napake, ki ga pri danem plinu ne moremo spremeniti, povzroči disperzija Čerenkove svetlobe v plinu. Napaka v določitvi Čerenkovega kota zaradi disperzije je:

$$\sigma_{\vartheta}^{dis} = \frac{1}{\tan(\vartheta)n} \frac{dn}{dE} \sigma_E. \quad (2.2)$$

Pri plinu dekafluoro butanu  $C_4F_{10}$  je vrednost  $dn/dE = 2.5 \cdot 10^{-5} eV^{-1}$  [3]. Napako v energiji lahko ocenimo iz grafa 1.4,  $\sigma_E = \sqrt{\langle E^2 \rangle - \langle E \rangle^2} \approx 0.54 eV$ . Za napako v kotu dobimo tako:

$$\sigma_{\vartheta}^{dis} = 0.24 \cdot 10^{-3}. \quad (2.3)$$

Fotonski detektor ima zrnato strukturo, ki določa najboljšo ločljivost, ki jo lahko s tem detektorjem dosežemo. Velikost zrna je izbrana tako, da je prispevek k napaki zaradi zrnatosti primerljiv z ostalimi prispevki. Pri detektorju Čerenkovih obročev spektrometra HERA-B je rob zrna enak  $a = 9 \text{ mm}$  (kvadrat površine  $9 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$ ). Prispevek k napaki v meritvi Čerenkovega kota ( $\sigma_{\vartheta}^{zr}$ ) izračunamo po naslednji enačbi:

$$\sigma_{\vartheta}^{zr} = \frac{a}{f\sqrt{12}} = 0.46 \cdot 10^{-3}. \quad (2.4)$$

Upošteval sem, da je verjetnost za zadetek enakomerna po celotni površini kvadratka.

K napaki prispeva tudi sferična aberacija, ker je zrcalo nagnjeno za  $\theta_T = 9^\circ$ . Napaka zaradi sferične aberacije raste z vpadnim kotom. Pri tipičnem vpadnem kotu delca ( $\theta = \theta_T = 9^\circ$ ) in pri največjem Čerenkovem kotu v danem sevalcu ( $55 \text{ mrad}$ ) znaša ta napaka [5]:

$$\sigma_{\vartheta}^{sa} = \frac{\sqrt{3}L}{8f}(\theta + \vartheta)^2\vartheta = 0.23 \cdot 10^{-3}, \quad (2.5)$$

kjer sem upošteval, da je dolžina sevalca  $L = 2.5 \text{ m}$  in goriščna razdalja zrcala  $f = r_{mi}/2 = 5.7 \text{ m}$ . To napako je moč nekoliko zmanjšati, če detektor premaknemo h krogelnemu zrcalu [5].

Smer delca določimo iz sledi, ki jo ta pusti v sledilnih detektorjih pred in za Čerenkovim števcem. Natančnost določitve smeri je odvisna od gibalne količine delca. Ta prispevek lahko ocenimo [2]:

$$\sigma_{\vartheta}^{sl} = 0.05 \cdot 10^{-3} \sqrt{1 + \left(\frac{20 \text{ GeV}}{p}\right)^2}. \quad (2.6)$$

Drugi člen je prispevek k napaki zaradi večkratnega sipanja delca v plinu. Pri zelo hitrih delcih ( $p \gg 20 \text{ GeV}/c$ ) je ta člen zanemarljiv, zato je v tem primeru  $\sigma_{\vartheta}^{sl} = 0.05 \cdot 10^{-3}$ .

Odstopanje zrcal od idealne oblike krogle oziroma ravnine tudi prispeva k napaki v določitvi Čerenkovega kota. Pri spektrometru OMEGA je bila optična natančnost zrcal  $\sigma_{\vartheta}^{mi} = 0.2 \cdot 10^{-3}$  [9]. Pri spektrometru HERA-B bo optični sistem sestavljen iz dveh zaporednih sistemov zrcal, zato sem pri skupnem izračunu napake upošteval dva prispevka  $\sigma_{\vartheta}^{mi}$ .

Prispevki k napaki so neodvisni med seboj, zato se seštevajo njihovi kvadrati. Če ne upoštevam nenatančne relativne naravnosti delov zrcal, znese skupna napaka:

$$\sigma_{\vartheta} = 0.63 \cdot 10^{-3} \quad (2.7)$$

Nenatančnosti pri nastavitvi zrcal ( $\sigma_{\vartheta}^{os}$ ) prav tako prispevajo k povečanju napake. Zato se spleča potruditi, da ta prispevek čim bolj zmanjšamo. Pokazal bom, da se da to napako zmanjšati pod 0.1 *mrad*.



## 3. poglavje

# Optični sistem

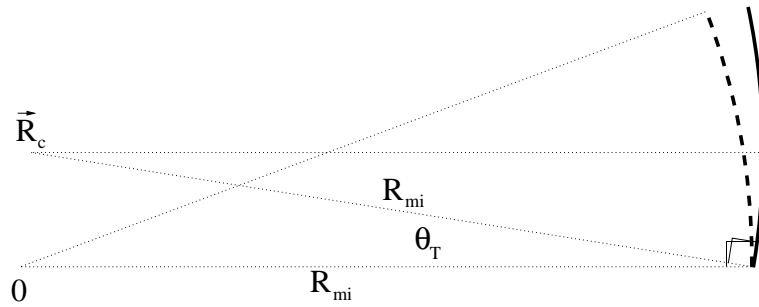
### 3.1 Krogelno zrcalo

Detektor Čerenkovih obročev je sestavljen iz dveh polovic, spodnje in zgornje, ki sta popolnoma simetrični, zato bom opisal samo zgornjo polovico obeh sistemov zrcal.

Krogelno zrcalo je narejeno iz kvalitetnega stekla, ki je prevlečeno z aluminijevim nanosom, debelim približno  $200 \text{ nm}$ . Preko aluminija je nanešena še plast magnezijevega difluorida ( $MgF_2$ ), da aluminij ne oksidira. Odbojnost zrcala je večja kot 85% (slika 1.4). Radij krogelnega zrcala je  $R_{mi} = 11400 \text{ mm}$  [10]. Presečišče krogelnega zrcala in protonskega žarka je od tarče oddaljeno za razdaljo, ki je enaka radiju zrcala. Ker je zrcalo nagnjeno za  $\theta_T = 9^\circ$ , je krivinsko središče zrcala nekoliko nad protonskim žarkom v točki, ki ima v koordinatnem sistemu s središčem v tarči in z osjo  $z$  v smeri protonskega žarka, naslednje koordinate (slika 3.1):

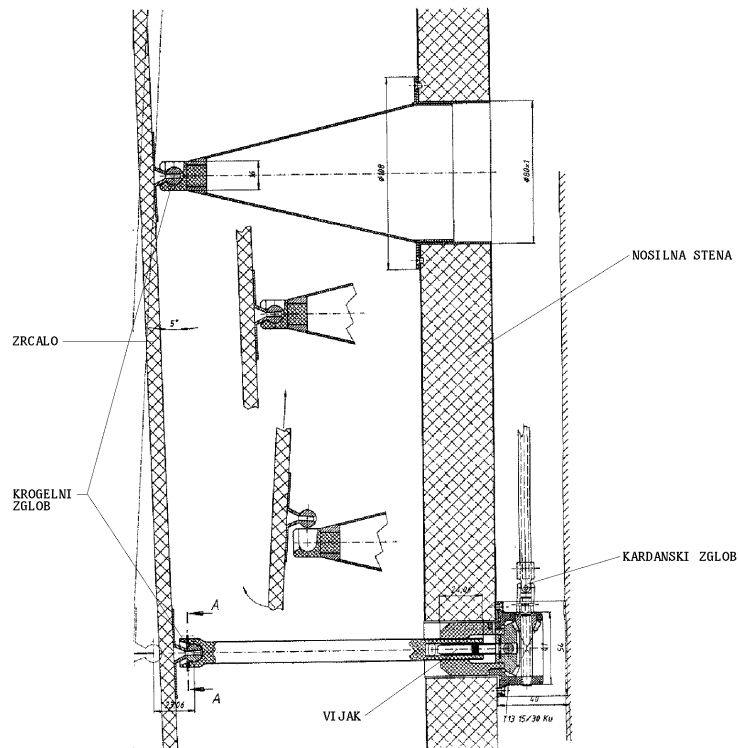
$$\vec{R}_c = \begin{bmatrix} 0 \\ \sin \theta_T \\ 1 - \cos \theta_T \end{bmatrix} \cdot R_{mi} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1783 \\ 140.4 \end{bmatrix} \text{ mm} \quad (3.1)$$

Krogelno zrcalo je sestavljeno iz 38 delov, ki so izdelani iz šestkotnikov z dolžino stranice  $a_6 = 360 \text{ mm}$  (slika 3.3). Vsak šestkotnik je pritrjen na nosilec v treh točkah. V eni točki je zrcalo pritrjeno preko krogelnega zgloba, v drugih dveh pa preko krogelnega zgloba in vijaka, s katerima je moč neodvisno nastaviti položaj posameznega dela (slika 3.2). Vijake je mogoče vrteti s pomočjo elektromotorjev, ki so krmiljeni od zunaj, tako da se da zrcala posta-



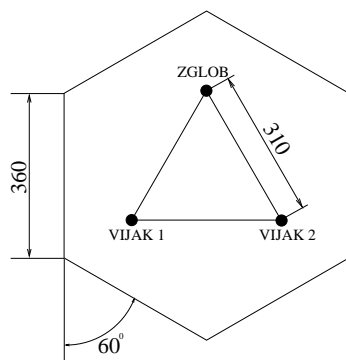
**Slika 3.1:** Krogelno zrcalo je nagnjeno za  $\theta_t = 9^\circ$ . Tarča je v izhodišču koordinatnega sistema.

viti v pravilno lego kar med meritvijo. Korak elektromotorja povzroči premik zrcala za  $0.01 \text{ mm}$  v točki, kjer je pričvrščeno, kar ustreza vrtenju zrcala za kot  $0.01/310 = 3 \cdot 10^{-5}$ .

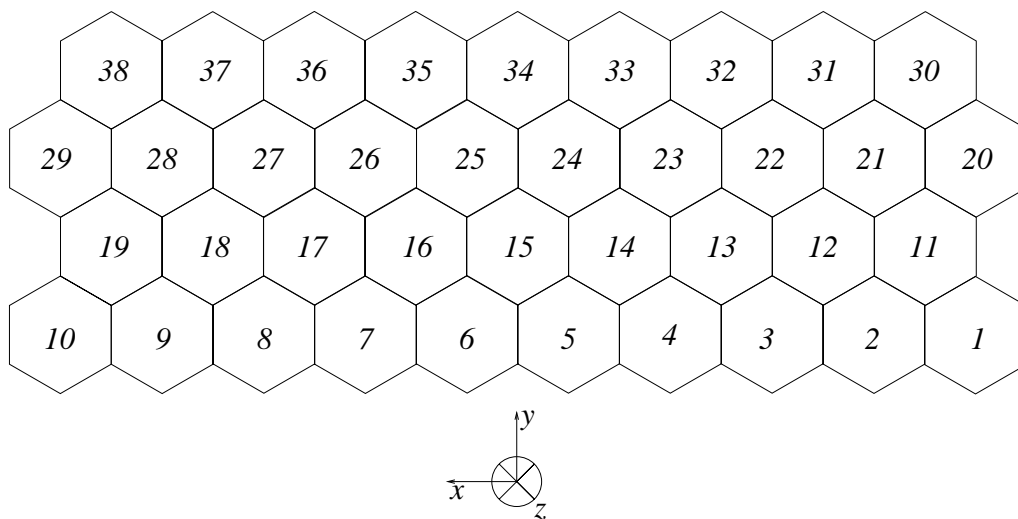


**Slika 3.2:** Stranski ris nosilca zrcala. Vsak del krogelnega zrcala je pričvrščen na nosilec v treh točkah preko krogelnih zglobov. V dveh točkah je del pričvrščen še preko vijakov, s katerima se da nastaviti naklon tega dela zrcala. Vijaki so preko kardanskih zglobov povezani z elektromotorji, ki jih je moč krmiliti od zunaj.





Slika 3.3: Del krogelnega zrcala je pravilni šestkotnik s stranico 360 mm.



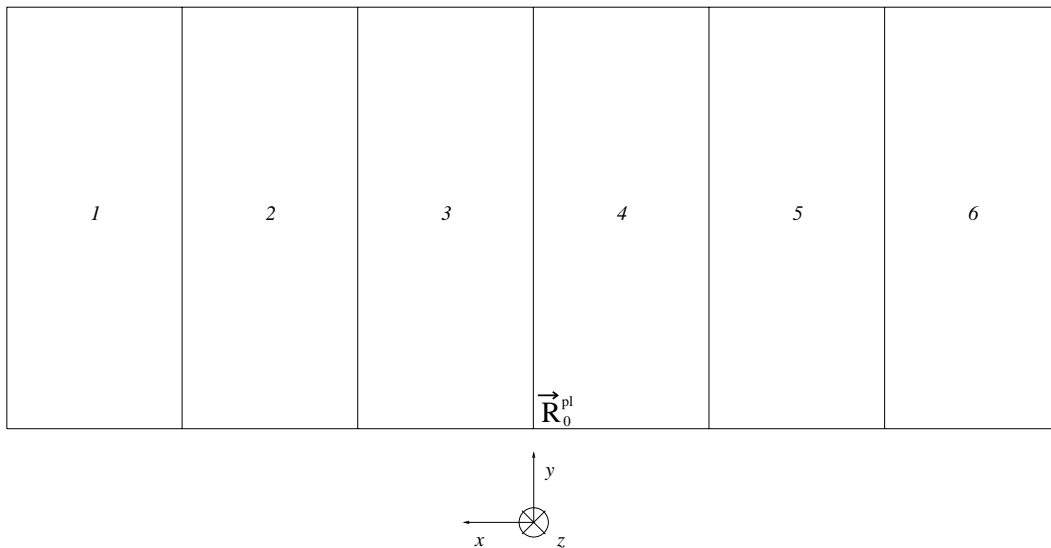
Slika 3.4: Slika kaže, kako sem oštevilčil posamezne dele krogelnega zrcala. Smer osi z je smer protonskega žarka, os y pa kaže v smeri magnetnega polja.

## 3.2 Ravno zrcalo

Fotonskega detektorja ne moremo postaviti bliže tarči, ker smo omejeni s prostorom. Zato fotone, ki nastanejo v sevalcu in se odbijejo na krogelnem zrcalu, z ravnim zrcalom usmerimo na detektor (sliki 1.1 in 1.2). Površina ravnega zrcala je obdelana na enak način kot površina krogelnega zrcala. Ravno zrcalo je široko  $4500\text{ mm}$  in visoko  $1800\text{ mm}$ . Pravokotnica na zrcalo oklepa s protonskim žarkom kot  $15^\circ$ . Sredina spodnjega roba zrcala je v naslednji točki:

$$\vec{R}_0^{pl} = \begin{bmatrix} 0 \\ 639.2 \\ 9032.8 \end{bmatrix} \text{ mm} \quad (3.2)$$

Ravno zrcalo je sestavljeno iz šestih enakih pravokotnikov (slika 3.5), ki so prav tako kot deli krogelnega zrcala pritrjeni v treh točkah in gibljivi na enak način.

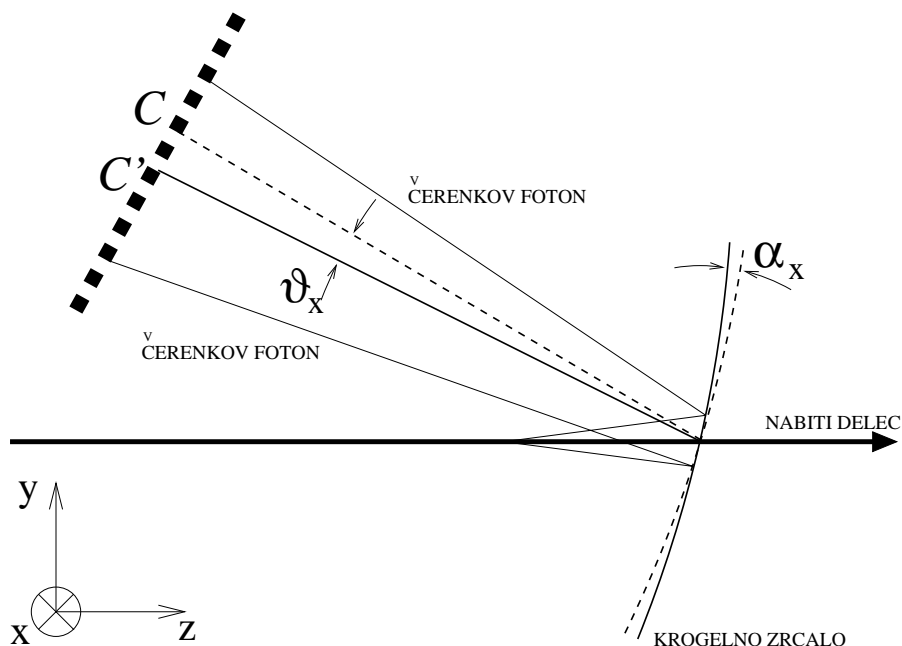


**Slika 3.5:** Iz slike se vidi, kako sem oštevilčil dele ravnega zrcala. Osi kažejo v iste smeri kot na sliki 3.4.

## 4. poglavje

### Umeritev optičnega sistema

Čerenkovi fotoni, ki jih izseva delec ob prehodu skozi sevalec, so porazdeljeni po obroču na detektorju (od tod tudi angleško ime Ring Imaging Čerenkov counter). Če deli ravnega in krogelnega zrcala niso idealno naravnani, središče obroča ne sovpa s točko, ki jo določa smer delca ( $C$  na sliki 4.1 in 4.2). Zaradi tega naredimo pri izračunu Čerenkovega kota še dodatno napako. V tem poglavju bom opisal metodo, kako lahko ta prispevek k napaki zmanjšam pod velikost ostalih prispevkov, ki sem jih opisal v poglavju o ločljivosti.



**Slika 4.1:** Črtkano je narisan idealni položaj zrcala, s polno črto pa njegov dejanski položaj. Središče Čerenkovega kroga na detektorju  $C'$  ne sovpa s točko, ki jo določa smer delca  $C$ .

Izmerjeni Čerenkov kot ( $\vartheta_{ch}$ ), kot med smerjo zadetka in smerjo središča kroga, ki jo določa idealno umerjeno zrcalo ( $C$  na sliki 4.1), lahko narišemo kot funkcijo polarnega kota okoli smeri delca ( $\varphi_{ch}$ ). Če so zrcala postavljena idealno, kot pričakujemo, je izmerjeni Čerenkov kot neodvisen od polarnega kota  $\varphi_{ch}$ . V primeru, ko so odstopanja od idealne postavitve zrcal dovolj majhna (majhna v primerjavi z največjim Čerenkovim kotom,  $55 \text{ mrad}$ ), je velikost  $\vartheta_{ch}$  tako odvisna od  $\varphi_{ch}$ :

$$\vartheta_{ch} = \vartheta_0 - A \cdot \cos(\varphi_{ch} - \varphi_0) \quad (4.1)$$

Krivulja je ponazorjena na sliki 4.3.

Enačbo 4.1 lahko napišemo v naslednji obliki:

$$\begin{aligned} \vartheta_{ch} &= \vartheta_0 - A \cdot \cos(\varphi_0) \cdot \cos(\varphi_{ch}) + A \cdot \sin(\varphi_0) \cdot \sin(\varphi_{ch}) = \\ &= \vartheta_0 - \vartheta_x \cdot \cos(\varphi_{ch}) + \vartheta_y \cdot \sin(\varphi_{ch}) \end{aligned} \quad (4.2)$$

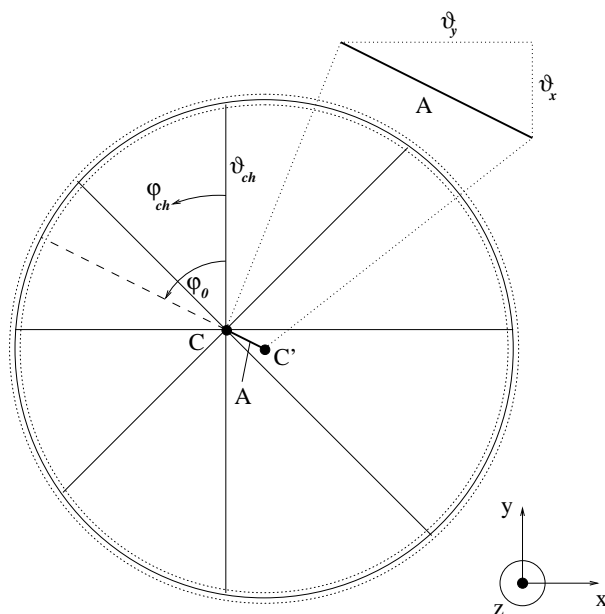
Zaradi nepravilne postavitve optičnega sistema dobimo dodatno napako pri meritvi Čerenkovega kota:

$$\begin{aligned} \sigma_{\vartheta}^{os} &= \sqrt{\langle (\vartheta_{ch} - \vartheta_0)^2 \rangle} = \sqrt{\left(\frac{\partial \vartheta_{ch}}{\partial \vartheta_x}\right)^2 \cdot \sigma_{\vartheta_x}^2 + \left(\frac{\partial \vartheta_{ch}}{\partial \vartheta_y}\right)^2 \cdot \sigma_{\vartheta_y}^2} = \\ &= \sqrt{\cos^2 \varphi_{ch} \cdot \sigma_{\vartheta_x}^2 + \sin^2 \varphi_{ch} \cdot \sigma_{\vartheta_y}^2} \end{aligned} \quad (4.3)$$

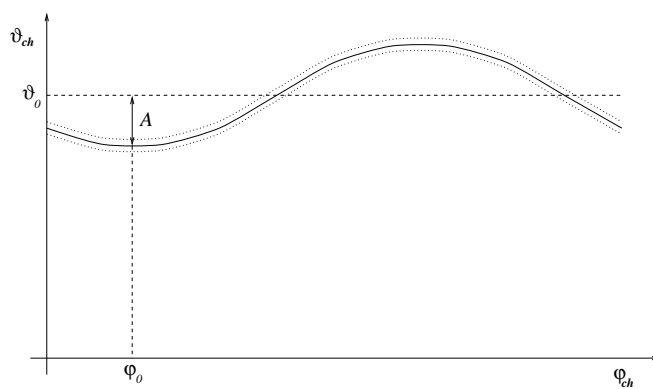
V primeru, ko sta standardni deviaciji  $\sigma_{\vartheta_x}$  in  $\sigma_{\vartheta_y}$  enaki, je  $\sigma_{\vartheta}^{os}$  neodvisna od kota  $\varphi_{ch}$ :

$$\sigma_{\vartheta}^{os} = \sigma_{\vartheta_x}^2 \quad (4.4)$$

Namen umeritve optičnega sistema je zmanjšati  $\sigma_{\vartheta}^{os}$ , zato iz izmerjenih  $\vartheta_{ch}$  in  $\varphi_{ch}$  določimo  $\vartheta_x$  in  $\vartheta_y$ , ki nastopata linearno v enačbi 4.2. Nato zrcala zavrtimo, tako da sta  $\vartheta_x$  in  $\vartheta_y$  enaka 0. Med njima in zasukoma obeh vijakov, na katerih je del zrcala pritrjen, velja linearna zveza. Premik zrcala v smeri  $\vartheta_x$  (vrtenje zrcala okoli osi  $x$ , slika 3.4) ustreza zasuku vijakov 1 in 2 (slika 3.3) v isto smer, premik v smeri  $\vartheta_y$  (vrtenje zrcala okoli osi  $y$ ) pa zasuku vijakov 1 in 2 v nasprotno smer.



**Slika 4.2:** Čerenkov obroč. Fotoni, ki jih je izseval nabit delec ob prehodu skozi sevalec, so statistično porazdeljeni po obroču. Točka v sredini predstavlja položaj središča kroga, kot ga pričakujemo v primeru idealno postavljenih zrcal.



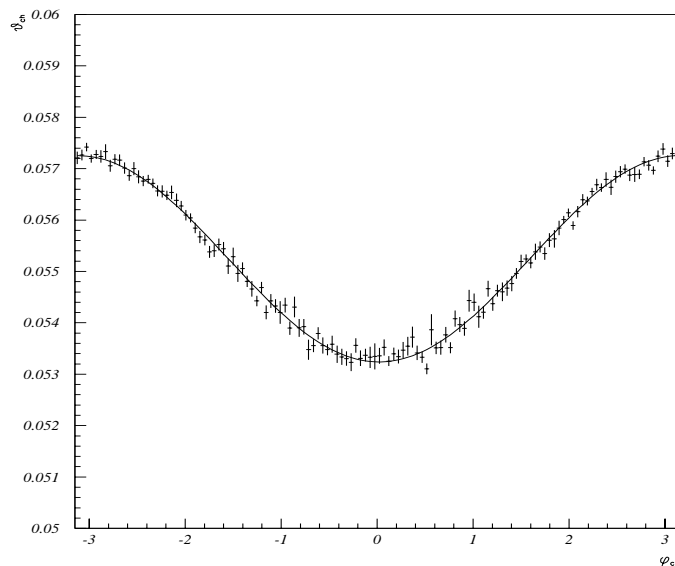
**Slika 4.3:**  $\vartheta_{ch}$  kot funkcija  $\varphi_{ch}$ . Parametri  $\varphi_0$ ,  $A$  in  $\vartheta_0$  so enaki kot tisti, ki nastopajo v enačbah 4.1 in 4.2.

## 4.1 Optični sistem z enim krogelnim zrcalom

Kot primer bom pokazal, kakšno porazdelitev  $\vartheta_{ch}$  po  $\varphi_{ch}$  dobim, v primeru najenostavnejšega optičnega sistema, to je enega samega krogelnega zrcala. Shematično je primer prikazan na sliki 4.1. S podobnim optičnim sistemom se je srečal dr. Samo Korpar pri testiranju različnih fotonovskih detektorjev v inštitutu DESY [11].

Izračunal sem parametre funkcije, ki jih dobim s prilagajanjem funkcije 4.2 izmerjenim podatkom (slika 4.4). Za prilagajanje sem uporabil podprogram *lfit* iz zbirke Numerical Recipes [12]. Podprogram izračuna najboljši približek tako, da je vsota kvadratov odstopanja podatkov od funkcije najmanjša. Poleg tega podprogram izračuna še nedoločenosti parametrov  $\sigma$ .

V primeru iz slike 4.4 zavrtim normalni vektor na sredino zrcala za  $1 \text{ mrad}$  okoli horizontalne osi (x). Središče Čerenkovega obroča se je zaradi tega premaknilo za  $2.0 \text{ mrad}$  ( $\vartheta_x = 2.0 \text{ mrad}$ ,  $\vartheta_y \approx 0$ ). S prilagajanjem funkcije 4.2 simuliranim merskim podatkom verno reproduciram premik krogelnega zrcala.



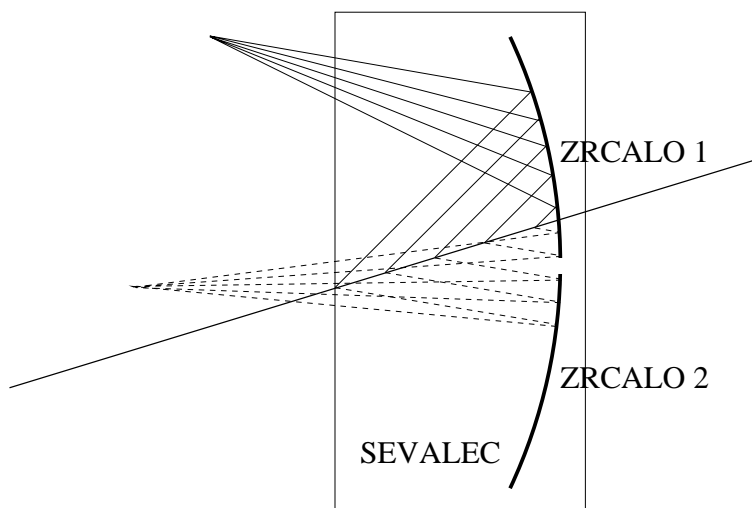
**Slika 4.4:** Primer prilagajanja funkcije 4.2. Diagram je narisano za 2700 fotonov, ki so se odbili na krogelnem zrcalu. Interval  $\varphi_{ch}$  sem razdelil na 128 delov. V vsakem delu je s križcem označeno povprečje izračunanih Čerenkovih kotov, ki sem jih izračunal iz zadetkov fotonov na detektorju in iz smeri delca. S črto je narisana najtesneje se prilegajoča funkcija 4.2. Njeni parametri imajo naslednje vrednosti  $\vartheta_0 = 0.05525 \pm 2.3 \cdot 10^{-5}$ ,  $\vartheta_x = 0.002007 \pm 7.6 \cdot 10^{-5}$  in  $\vartheta_y = -0.000040 \pm 1.4 \cdot 10^{-5}$ .

## 4.2 Enolični fotoni

Če želimo določiti odstopanja delov zrcal od idealne lege, moramo vedeti, na katerem delu zrcala se je rekonstruirani foton odbil. Iz koordinate zadetka fotona na detektorju in iz smeri delca, ki je izseval ta foton, je moč izračunati Čerenkov kot in polarni kot okoli smeri delca. Ne da pa se ugotoviti, v katerem delu sevalca je foton nastal (slika 4.5). Če želimo vedeti, na katerem delu krogelnega zrcala se je foton odbil, pogledamo, na katerem delu bi se odbil tisti foton, ki bi bil izsevan čisto na začetku ali čisto na koncu poti delca skozi sevalec, pod istim Čerenkovim in polarnim kotom, kot rekonstruirani foton. Če bi se oba fotona odbila na istem delu krogelnega zrcala, bi to veljalo tudi za fotone, ki so bili izsevani kjerkoli drugje na poti delca skozi sevalec.

Podoben postopek lahko ponovimo za dele ravnega zrcala.

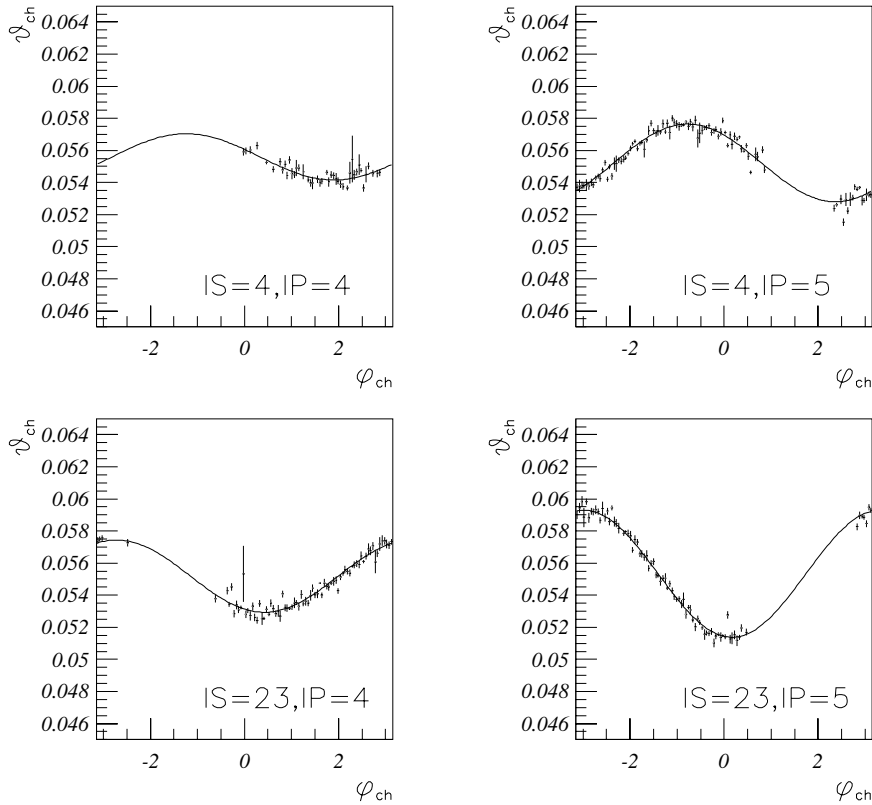
Fotone, za katere vemo, da so zadeli določeni del krogelnega zrcala in določeni del ravnega zrcala (slika 4.5), imenujem enolični fotoni, ter jih uporabim pri določanju odmika delov zrcal od idealne lege.



**Slika 4.5:** Zrcalo je sestavljeno iz dveh delov. Iz točke zadetka fotona na detektorju ne moremo ugotoviti, v katerem delu sevalca je foton nastal. Fotoni, označeni s polno črto, so enolični, tisti, označeni s črtkano, pa niso enolični.

Pri sistemu dveh zrcal, ki sta obe sestavljeni iz delov, v mnogih primerih enolični fotoni ne zavzamejo celotnega kota okoli smeri delca ( $\varphi_{ch}$ ) za dani

par dela krogelnega in ravnega zrcala (slika 4.6). Prilagajane funkcije so v teh primerih določene manj natančno kot v primerih, ko  $\varphi_{ch}$  pokrije cel kot  $2\pi$ . Na sliki 4.6 sem narisal štiri različne primere, kjer  $\varphi_{ch}$  ne pokrije celega kota.



**Slika 4.6:** Na sliki so s črto označene podatkom prilagajane funkcije 4.2, s križci pa povprečja izmerjenih točk na del intervala in njihove napake.  $\varphi_{ch}$  enoličnih fotonov ni v nobenem od narisanih primerov pokrilo celega kota  $2\pi$ . Zgoraj sta narisana primera za del krogelnega zrcala številka 4 ter za dva sosednja dela ravnega zrcala številka 4 in 5. Spodaj je primer za del krogelnega zrcala številka 23 in za dela ravnega zrcala 4 in 5. Enolični fotoni, ki so se odbili na sosednjih delih ravnega zrcala in na istem delu krogelnega zrcala, so v danem primeru izotropne porazdelitve delcev pokrivali skoraj komplementarne intervale kota  $\varphi_{ch}$ .



## 4.3 Splošni primer

V tem delu bom opisal metodo za umeritev krogelnega zrcala iz  $N$  delov ter ravnega zrcala iz  $M$  delov. Metoda je univerzalna ne glede na število delov zrcal.

Iz meritev določimo s prilagajanjem funkcije iz enačbe 4.2 premik središča Čerenkovega obroča na detektorju,  $\vartheta_{ij}^x$ ,  $\vartheta_{ij}^y$  (slika 4.4), za vsak par dela  $i$  na krogelnem zrcalu in dela  $j$  na ravnem zrcalu, ki se med seboj prekrivata. Se pravi, da obstajajo enolični fotoni, ki se odbijejo na delu  $i$  krogelnega in hkrati na delu  $j$  ravnega zrcala (slika 4.7). Iz slike obroča na detektorju je moč ugotoviti le celotni premik Čerenkovega obroča zaradi premikov obeh delov zrcal. Neznane premike Čerenkovega obroča, ki jih povzroči premik samo dela krogelnega oziroma samo dela ravnega zrcala, lahko zapišemo v vektor  $\vec{\xi}$ :

$$\xi_i = \vartheta_{s\ i}^x \quad i \in [1, N] \quad (4.5)$$

$$\xi_i = \vartheta_{s\ i}^y \quad i \in [N + 1, 2N] \quad (4.6)$$

$$\xi_i = \vartheta_{p\ i}^x \quad i \in [2N + 1, 2N + M] \quad (4.7)$$

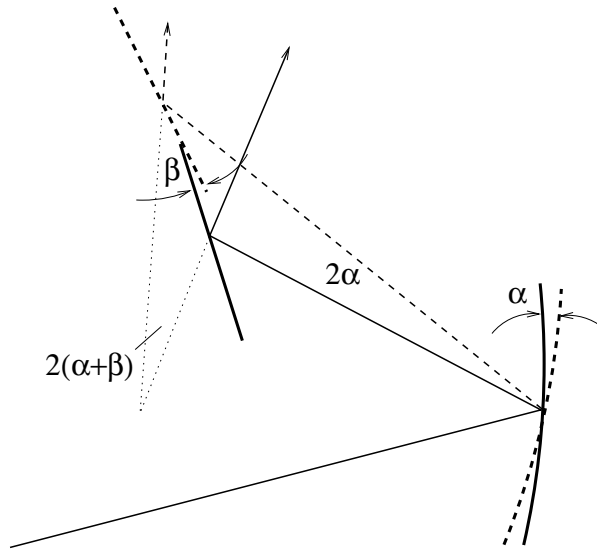
$$\xi_i = \vartheta_{p\ i}^y \quad i \in [2N + M + 1, 2N + 2M] \quad (4.8)$$

Spodnja indeksa  $p$  oziroma  $s$  opozarjata, da dani premik Čerenkovega obroča pripada ravnemu oziroma krogelnemu delu.

Premiki Čerenkovega obroča na detektorju  $\vec{\xi}$ :  $\vartheta_{s\ i}^x$ ,  $\vartheta_{s\ i}^y$ ,  $\vartheta_{p\ i}^x$  in  $\vartheta_{p\ i}^y$  so sorazmerni z odmiki delov zrcal od idealne lege. Sorazmernostne konstante lahko določimo iz razmerja dolžin poti fotona do zrcala in od zrcala do detektorja (slika 4.8):

$$\vartheta_{s\ i}^x = a \cdot \alpha_i^x \quad (4.9)$$

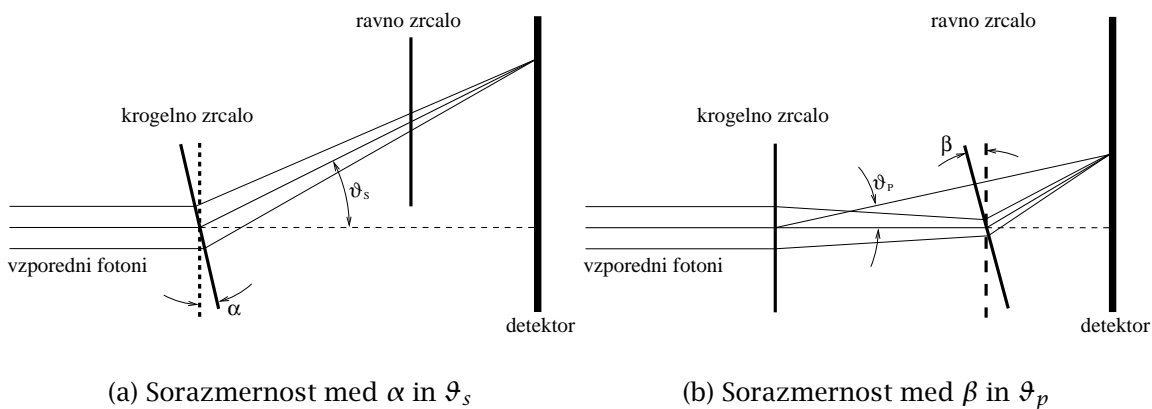
$$\vartheta_{s\ i}^y = a \cdot \alpha_i^y \quad (4.10)$$



**Slika 4.7:** Odboj fotona na krogljnim in ravnem zrcalu. S črtkano črto je označen primer, ko so zrcala postavljena idealno, s polno črto pa primer, ko je krogljno zrcalo premaknjeno iz idealne lege za kot  $\alpha$  in ravno za kot  $\beta$ .

$$\vartheta_{p\ i}^x = b \cdot \beta_i^x \quad (4.11)$$

$$\vartheta_{p\ i}^y = b \cdot \beta_i^y \quad (4.12)$$



**Slika 4.8:** Shematični prikaz slike 4.7: zveza med  $\alpha$  in  $\vartheta_s$  ter med  $\beta$  in  $\vartheta_p$ . Krogljno zrcalo vzporedne fotone zbere v točki na detektorju. Črtkano je narisana idealna situacija.

Pot fotona od ravnega zrcala do detektorja je v povprečju za približno dvakrat krajša kot pot od krogelnega zrcala do detektorja. Zato je tudi učinek na sliko na detektorju približno dvakrat manjši, če premaknemo ravno zrcalo, kot pa če premaknemo krogelno zrcalo. Razmerje delov poti fotona ni čisto konstantno, zato sem faktorja  $a = 1.98$  in  $b = 1.05$  določil iz simulacije.

Odmike od idealne lege sem računal z metodo najmanjših kvadratov. Na minimum moramo zmanjšati učinek napačne nastavitve zrcal na sliko, ki jo dobimo na detektorju. To pomeni, da moramo poiskati minimum naslednje funkcije:

$$\sum_{i,j} \frac{(\vartheta_{ij}^x - \vartheta_{s i}^x - \vartheta_{p j}^x)^2}{\sigma_{x ij}^2} + \frac{(\vartheta_{ij}^y - \vartheta_{s i}^y - \vartheta_{p j}^y)^2}{\sigma_{y ij}^2}, \quad (4.13)$$

kjer sta  $\vartheta_{ij}^x$  in  $\vartheta_{ij}^y$  parametra, ki ju dobim s prilagajanjem (slika 4.2 in enačba 4.2),  $\sigma_{x ij}$  in  $\sigma_{y ij}$  pa njuni standardni deviaciji. Indeks  $i$  teče po vseh delih krogelnega zrcala,  $j$  pa po vseh delih ravnega zrcala, ki z delom  $i$  delijo enolične fotone.

Z odvajanjem enačbe 4.13 po parametrih dobimo naslednji sistem linearnih enačb:

$$\sum_i \frac{\vartheta_{ki}^x - \xi_k - \xi_{2N+i}}{\sigma_{x ki}^2} = 0, \quad (4.14)$$

$$\sum_i \frac{\vartheta_{ki}^y - \xi_{N+k} - \xi_{2N+M+i}}{\sigma_{y ki}^2} = 0, \quad (4.15)$$

$$\sum_i \frac{\vartheta_{ik}^x - \xi_i - \xi_{2N+k}}{\sigma_{x ik}^2} = 0, \quad (4.16)$$

$$\sum_i \frac{\vartheta_{ik}^y - \xi_{N+i} - \xi_{2N+M+k}}{\sigma_{y ik}^2} = 0, \quad (4.17)$$

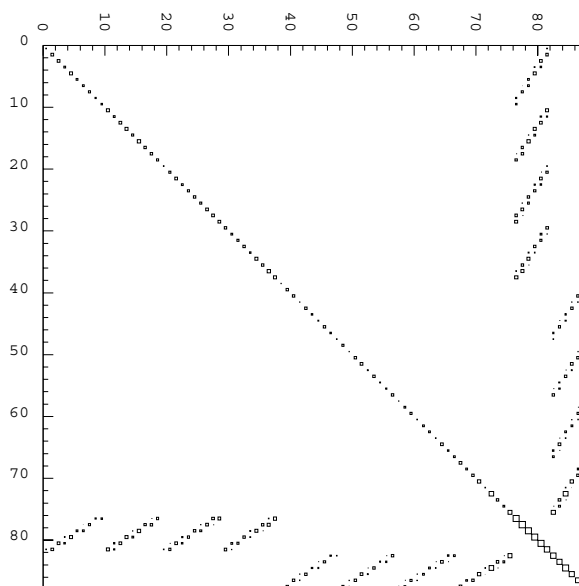
ki ga lahko krajše zapišemo v matrični obliki:

$$\underline{\mathbf{A}} \cdot \vec{\xi} = \vec{b}, \quad (4.18)$$

Vektor  $\vec{b}$  razpade na dele, ki pripadajo x in y komponentam odmikov posameznih delov krogelnega in ravnega zrcala od idealne lege ( $\vartheta_{s i}^x$ ,  $\vartheta_{s i}^y$ ,  $\vartheta_{p i}^x$  in  $\vartheta_{p i}^y$ ):

		$N$	$N$	$M$	$M$
$N$		$S1$	$0$	$\Sigma 1$	$0$
$N$		$0$	$S2$	$0$	$\Sigma 2$
$M$		$\Sigma 1^T$	$0$	$T1$	$0$
$M$		$0$	$\Sigma 2^T$	$0$	$T2$

Slika 4.9: Matrika linearnega sistema iz enačb 4.14-4.17.



Slika 4.10: Matrika, ki jo dobimo pri reševanju linearnega sistema za sistem iz 38 delov kroglnega zrcala in 6 delov ravnega zrcala, kakršen je v detektorju Čerenkovih obročev spektrometra HERA-B (sliki 3.4 in 3.5). Velikost posameznega elementa matrike je sorazmerna z velikostjo kvadrata. Izvendiagonalne matrike  $\Sigma 1$  in  $\Sigma 2$  niso polne, ker se ne prekriva vsak del ravnega zrcala z vsakim delom kroglnega zrcala.

$$\vec{b} = \begin{pmatrix} P1_1 \\ \vdots \\ P1_N \\ P2_1 \\ \vdots \\ P2_N \\ R1_1 \\ \vdots \\ R1_M \\ R2_1 \\ \vdots \\ R2_M \end{pmatrix} \quad (4.19)$$

Posamezni deli vektorja  $\vec{b}$  so:

$$P1_i = \sum_{j=1}^M \frac{\mathfrak{g}_{ij}^x}{\sigma_x^2} \quad (4.20)$$

$$P2_i = \sum_{j=1}^M \frac{\mathfrak{g}_{ij}^y}{\sigma_y^2} \quad (4.21)$$

$$R1_i = \sum_{j=1}^N \frac{\mathfrak{g}_{ji}^x}{\sigma_x^2} \quad (4.22)$$

$$R2_i = \sum_{j=1}^N \frac{\mathfrak{g}_{ji}^y}{\sigma_y^2} \quad (4.23)$$

Matrika  $\underline{\mathbf{A}}$  ima bločno zgradbo, ki je simbolično prikazana na sliki 4.9.

Kvadratne matrike  $S1$ ,  $S2$ ,  $T1$  in  $T2$  so diagonalne. Njihove vrednosti so sledeče:

$$S1_{ij} = \delta_{ij} \cdot \sum_{k=1}^M \frac{1}{\sigma_x^2} \quad (4.24)$$

$$S2_{ij} = \delta_{ij} \cdot \sum_{k=1}^M \frac{1}{\sigma_y^2} \quad (4.25)$$

$$T1_{ij} = \delta_{ij} \cdot \sum_{k=1}^N \frac{1}{\sigma_x^2} \quad (4.26)$$

$$T2_{ij} = \delta_{ij} \cdot \sum_{k=1}^N \frac{1}{\sigma_{y\ ki}^2} \quad (4.27)$$

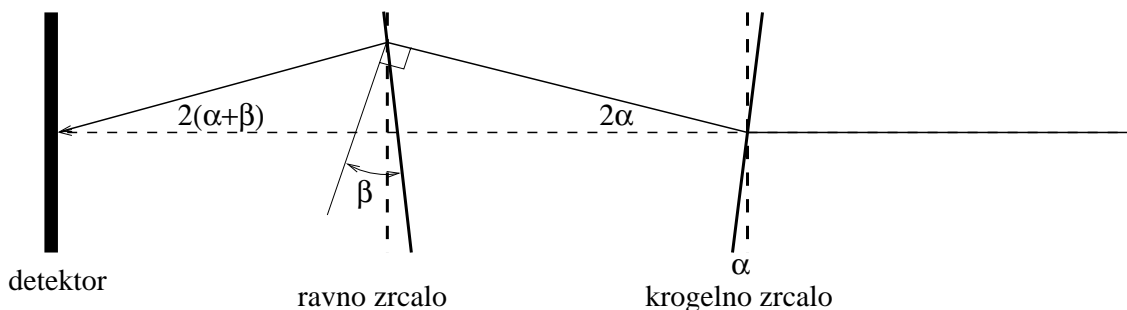
Izvendiagonalne matrike  $\Sigma 1$  and  $\Sigma 2$  so od nič različne samo tam, kjer se prekrivata pripadajoča dela na krogelnem in ravnem zrcalu. Matriki pod diagonalo sta kar transponirani matriki tistima dvema nad diagonalo. Vrednosti njihovih komponent so:

$$\Sigma 1_{i,j} = \sigma_x^{-2}{}_{ij} \quad (4.28)$$

$$\Sigma 2_{i,j} = \sigma_y^{-2}{}_{ij} \quad (4.29)$$

Na sliki 4.10 sem narisal primer matrike sistema, ki sem ga v resnici reševal. Površina kvadratkov je sorazmerna z velikostjo matričnega elementa.

Vseeno je, če nastavimo zrcala idealno, ali pa če jih premaknemo tako, da se napaki na krogelnih in ravnih zrcalih med seboj odštejeta (slika 4.11). Zato je tisti del  $\vec{\xi}$ , ki pripada krogelnemu delu, nedoločen do konstante, del, ki pripada ravnemu zrcalu, pa do konstante z nasprotnim predznakom. Izbrati moramo določeni del krogelnega ali ravnega zrcala in izračunati relativne premike ostalih delov glede na izbranega. Izberemo naprimer del  $k$  na krogelnem zrcalu. To pomeni, da v matriki  $\underline{A}$  izpustimo vse vrstice in stolpce, ki pripadajo danemu delu. To so  $k$  in  $N + k$  vrstica in  $k$  in  $N + k$  stolpec. Tako v resnici rešujemo manjši sistem dimenzij  $(2(N - 1) + 2M)^2$ .



**Slika 4.11:** Poenostavljena slika odboja fotona na dveh zaporednih zrcalih. Na detektorju dobimo enako sliko, če sta zrcala idealno postavljena, ali pa če se napaki na obeh zrcalih med seboj izničita.

## 5. poglavje

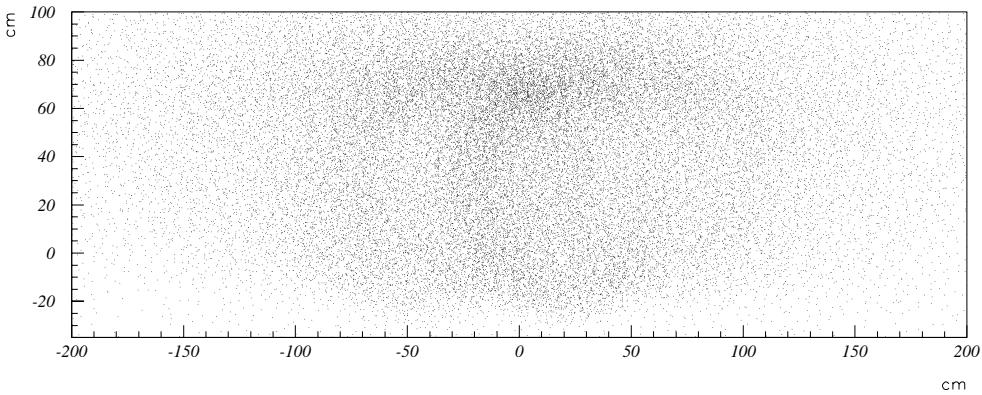
# Računalniška simulacija

Za preizkus metode umeritve optičnega sistema sem priredil računalniško simulacijo, delo dr. Marka Stariča. Dodal sem odboj na ravnem zrcalu, razdelil zrcala na dele in dodal še napako v določitvi Čerenkovega kota  $0.63 \text{ mrad}$ .

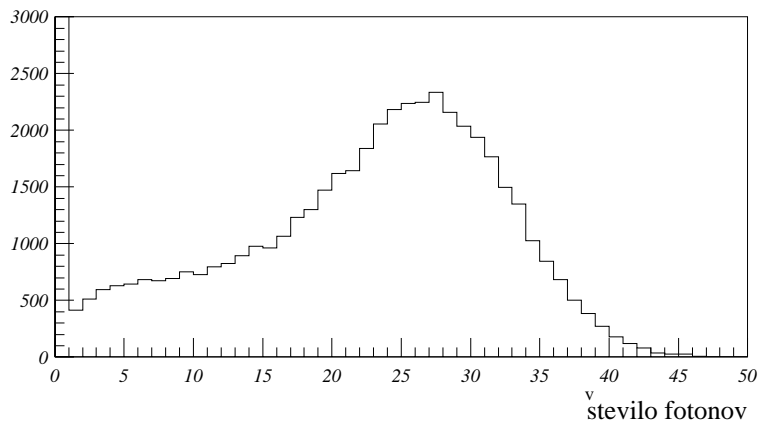
Najprej sem generiral delce izotropno v prostorski kot spektrometra HERA-B. Generiral sem kar pione z zelo velikimi gibalnimi količinami ( $1000 \text{ GeV}/c$ ), tako da so se gibalno praktično s svetlobno hitrostjo  $\beta = 1$  in so v izbranem sevalcu  $C_4F_{10}$  sevali Čerenkove fotone pod kotom  $\vartheta = \arccos(1/n) = 55 \text{ mrad}$ . Kasneje sem kot vhod v simulacijo uporabil datoteko z realističnimi podatki, ki so bili generirani s simulacijskim paketom GEANT. V datoteki so bile zapisane mase, gibalne količine in smeri delcev pri vходу v sevalec detektorja Čerenkovih obročev. Porazdelitev fotonov na detektorju (slika 5.1) je veliko gostejša na področju, kjer so fotone izsevali delci, ki so leteli pod majhnim kotom glede na protonski žarek.

Za vsak delec sem izračunal povprečno število fotonov glede na dolžino poti delca v sevalcu in njegovo hitrost (enačba 1.6). Delci s hitrostmi blizu svetlobne ( $\beta \approx 1$ ) izsevajo v povprečju 30 fotonov, tisti, ki imajo hitrost manjšo od praga ( $\beta < 1/n$ ), pa ne izsevajo nobenega Čerenkovega fotona. Število fotonov je bilo porazdeljeno okoli povprečnega števila fotonov po Poissonovi porazdelitvi. Poissonovo porazdelitev sem zamenjal kar z Gaussovo, če je bilo povprečno število fotonov večje kot 8. Na sliki 5.2 je prikazana porazdelitev nabitih delcev po številu Čerenkovih fotonov, ki jih je en nabiti delec izseval. Smeri delcev so bile simulirane s simulacijskim paketom GEANT.

Za vsak izsevani foton sem potem izračunal koordinate točke, v kateri ta zadene detektor. Upošteval sem, na katerem delu krogelnega oziroma ravnega



**Slika 5.1:** Porazdelitev fotonov na zgornjem detektorju. (0,0) je točka, ki jo zadenejo fotoni, katerih smeri so vzporedne s protonskim žarkom.



**Slika 5.2:** Porazdelitev nabitih delcev po številu fotonov, ki jih je izseval en nabiti delec.

zrcala se je dani foton odbil. Sproti sem računal, če je foton enoličen za kro- gelno oziroma ravno zrcalo (glej 3. poglavje). Parametre enoličnih fotonov sem zapisoval v datoteko in jih uporabil za izračun premikov delov obeh zrcal.



## 6. poglavje

### Rezultati

V tem poglavju bom predstavil rezultate, ki jih dobim pri umeritvi delov zrcal detektorja Čerenkovih obročev, kakršen je v spektrometru HERA-B. Za umeritev sem uporabil metodo, opisano v 5. poglavju. Ker je detektor Čerenkovih obročev sestavljen iz simetrične spodnje in zgornje polovice, bom obravnaval bom samo zgornjo.

#### 6.1 Izotropna porazdelitev

Najprej sem preizkusil metodo, tako da sem generiral delce izotropno po prostorskem kotu, ki ga pokriva spektrometer HERA-B. Začetni premiki zrcal so bili porazdeljeni po Gaussovi porazdelitvi s standardno deviacijo  $\sigma_{\alpha_x} = \sigma_{\alpha_y} = 1 \text{ mrad}$  za dele krogelnega zrcala in  $\sigma_{\beta_x} = \sigma_{\beta_y} = 2 \text{ mrad}$  za dele ravnega zrcala.

V primeru izotropne porazdelitve sem generiral 20000 delcev. To pomeni, da je približno 10000 delcev letelo v zgornjo polovico spektrometra. Generiral sem pione, ki so sevali Čerenkove fotone pod kotom  $55 \text{ mrad}$  (enačba 1.3). Na vsak delec dobim v povprečju približno 3 enolične fotone, kar pomeni, da v danem primeru zadene zgornji detektor približno 30000 enoličnih fotonov.

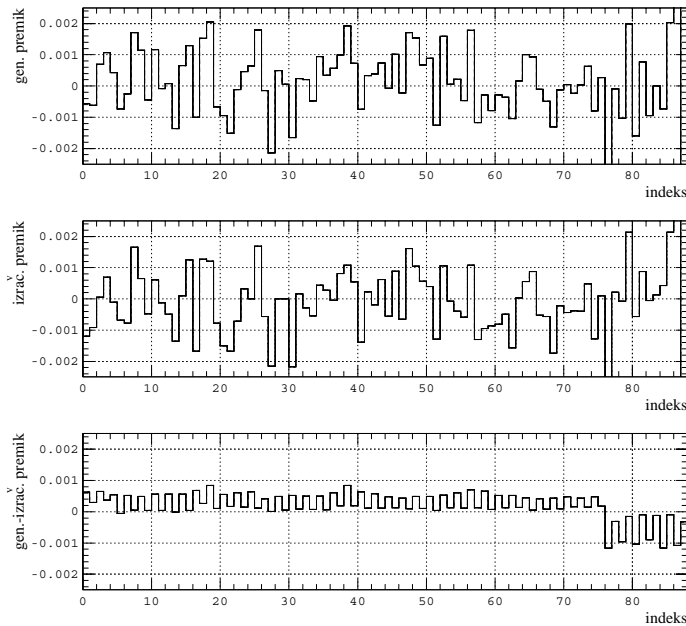
Indeks na abscisnih oseh grafov v tem poglavju, na katerih so predstavljeni odmiki delov zrcal, pomeni  $x$  in  $y$  komponente odklikov delov krogelnih ( $\alpha_x$  in  $\alpha_y$ ) in ravnih zrcal ( $\beta_x$  in  $\beta_y$ ). Lihi indeksi ustrezajo komponentam  $x$ , sodi pa komponentam  $y$ . Indeksi od 1 do 76 ustrezajo delom krogelnega zrcala, od

77 do 88 pa delom ravnega zrcala.

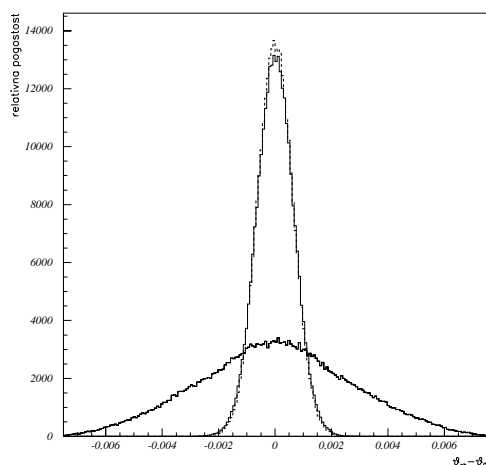
Kot sem razložil že v poglavju 4.3, je moč zrcala nastaviti samo relativno na enega izmed delov. Del številka 15 na krogelnem zrcalu ima središčni položaj (slika 3.4), zato sem odmike računal glede na ta del (slika 6.1).

Na sliki 6.2 sem prikazal porazdelitve Čerenkovih fotonov po razliki med rekonstruiranim Čerenkovim kotom ( $\vartheta_{ch}$ ) in Čerenkovim kotom, izračunanim iz hitrosti delca ( $\vartheta_0$ ). Porazdelitev fotonov, ki so se odbili na popravljenem sistemu zrcal ( $\sigma_\vartheta = 0.66 \text{ mrad}$ ), je zelo blizu porazdelitvi fotonov, ki so se odbili na idealno postavljenem sistemu zrcal ( $\sigma = 0.63 \text{ mrad}$ ).

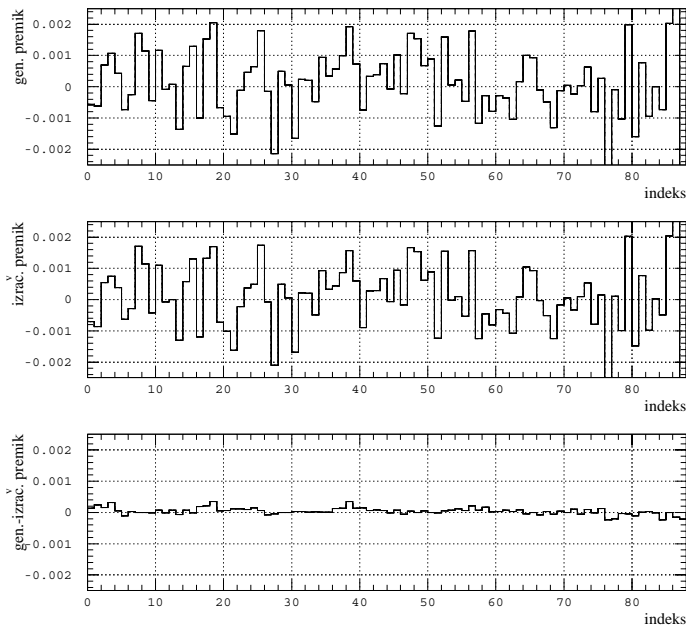
Da bi bila grafična predstavitev rezultata nazornejša, sem od vseh izračunanih premikov delov krogelnega zrcala odštel pravo vrednost generiranega odmika dela številka 15 krogelnega zrcala. Dele ravnega zrcala sem premaknil za ustrezen delež v drugo stran. Na ta način postanejo popravljeni odmiki simetrično porazdeljeni okoli 0 (slika 6.3).



**Slika 6.1:** Premiki, izračunani relativno na del krogelnega zrcala številka 15. Za sliko na detektorju je vseeno, če so deli krogelnega zrcala premaknjeni v eno, deli ravnega zrcala pa za ustrezen delež ( $b/a$ ) v drugo stran.



**Slika 6.2:** Porazdelitev Čerenkovih fotonov po razliki med rekonstruiranim Čerenkovim kotom in Čerenkovim kotom izračunanem iz hitrosti delca ( $\theta_{ch} - \theta_0$ ). Širša porazdelitev, označena s polno črto, ustreza nepopravljenemu primeru, ožja porazdelitev, označena s polno črto, pa popravljenim premikom zrcal. S prekinjeno črto je narisan primer za idealno postavljena zrcala.



**Slika 6.3:** Od izračunanih premikov delov krogelnega zrcala sem odštevanje rešnični premik 15. dela krogelnega zrcala in ustrezno pomnoženega prištevanje odmikom delov ravnega zrcala. Popravljeni premiki so tako porazdeljeni okoli 0.

### 6.1.1 Iterativna metoda

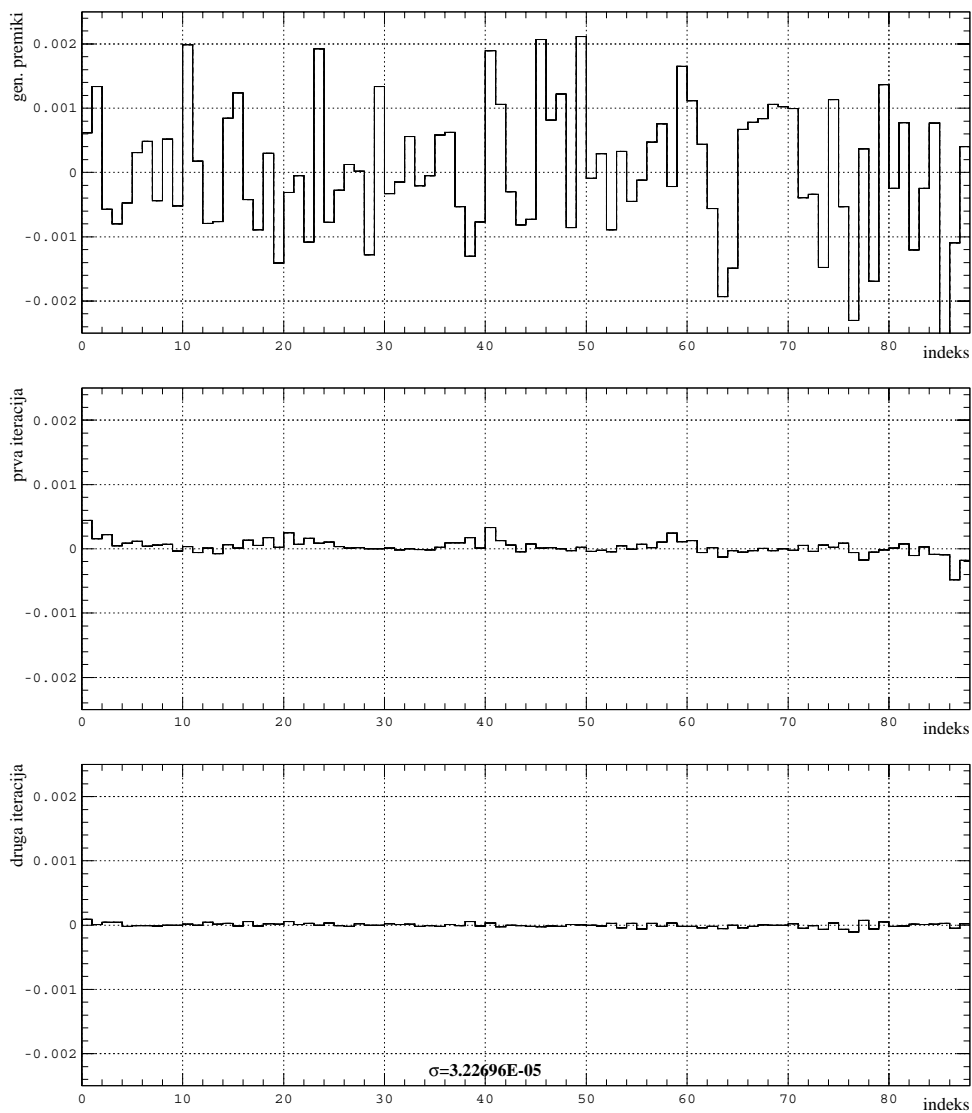
Linearni sistem 4.14 do 4.17 je samo približek za realni problem (funkcija 4.1, predpostavka, da sta koeficienta  $a$  in  $b$  (enačbe 4.9 do 4.12) konstantna za celi zrcali). Zato dobimo boljše rezultate, če postopek ponovimo s popravljenimi odmiki delov zrcal. Generirane odmike zrcal sem popravil za vrednost izračunanih odmikov (slika 6.1). S tako popravljenimi smermi delov zrcal sem ponovil postopek izračuna odmikov od idealne lege.

Na sliki 6.4 sem primerjal generirane premike delov zrcal z odmiki delov zrcal po prvi in po drugi ponovitvi. Med seboj sem primerjal deset različnih naborov naključno generiranih premikov delov zrcal (na sliki 6.5 sem jih narisal pet). Pri izotropni porazdelitvi delcev so bili v vseh primerih popravljene odmiki od idealne lege po drugi ponovitvi tako majhni, da je bila njihova standardna deviacija manjša kot  $0.1 \text{ mrad}$ .

Pomembno je, kako natančno lahko merimo Čerenkov kot delca. Po prvi in po drugi ponovitvi sem pogledal, kakšna je napaka, ki jo povzročijo preamknjena zrcala na detektorju (slike 6.7, 6.8, 6.9 in 6.10). Enolični fotoni, ki so se odbili na določenem delu krogelnega zrcala, se lahko odbijejo na največ dveh sosednjih delih ravnega zrcala (to približno velja tudi za realistično porazdelitev delcev, opisano v naslednjem podpoglavju). Zato sem amplitudo odmika od Čerenkovega kota,  $\vartheta_{ij}$ , predstavil z dvodimenzionalnim grafom, kjer sem risal za vsak del krogelnega zrcala številka  $i$  dva stolpca. Če so obstajali enolični fotoni, ki so se odbili na danem delu krogelnega zrcala in še na dveh različnih delih ravnega zrcala, sta bila narisana oba stolpca, drugače samo eden, ali v najslabšem primeru, ko ni bilo enoličnih fotonov za dani par delov zrcal, tudi nobeden.

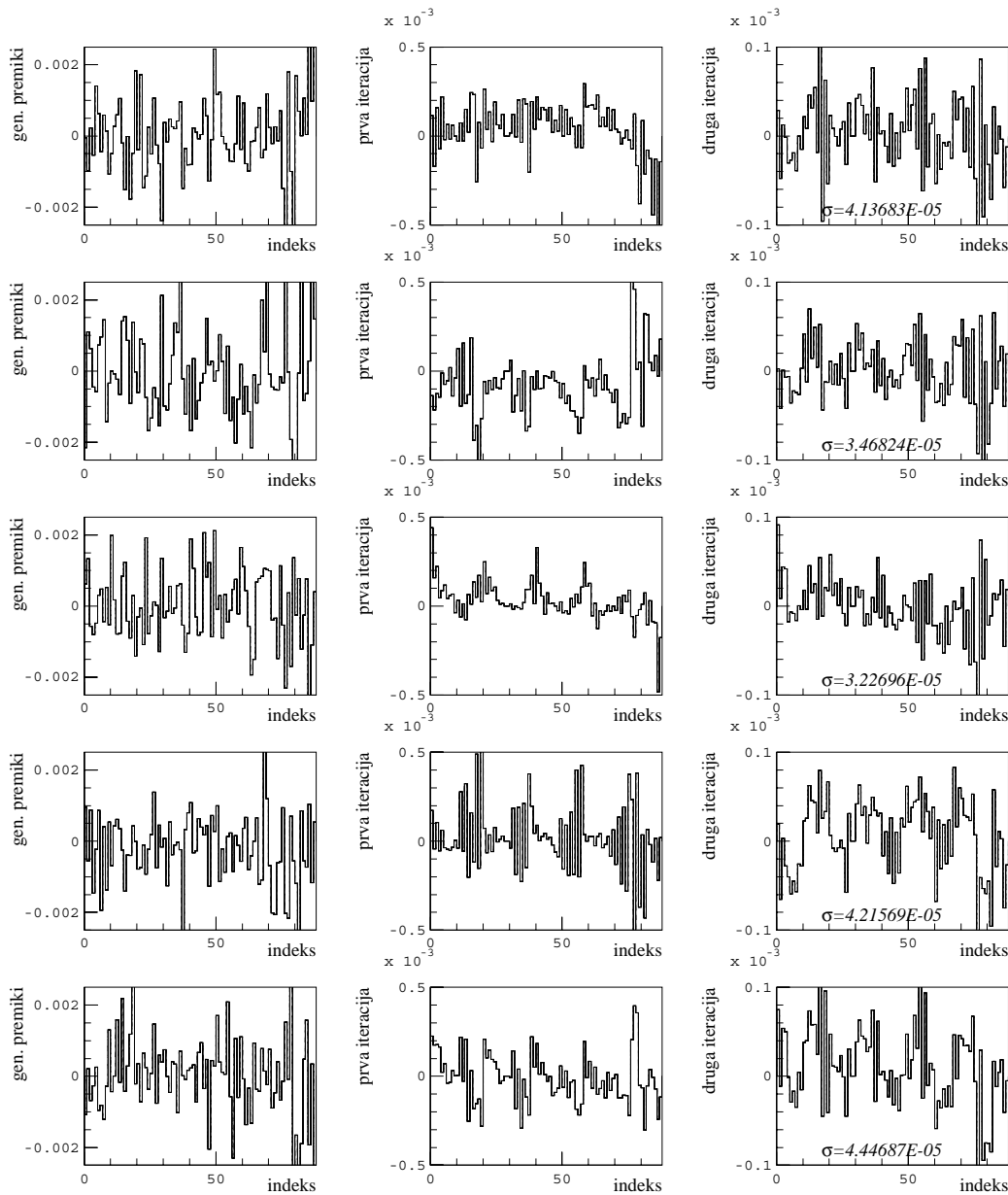
Amplitudo odmika od Čerenkovega kota,  $\vartheta_{ij}$ , sem določil s prilagajanjem funkcije 4.2 enoličnim fotonom iz danega para delov krogelnega in ravnega zrcala. Pri parih, na katerih se je odbilo malo enoličnih fotonov, je bila napaka v določitvi Čerenkovega kota praviloma velika. Za nazorno predstavo sem za primer s slike 6.9 narisal zvezo med številom enoličnih fotonov in amplitudo odmika od Čerenkovega kota na detektorju,  $\vartheta_{ij}$  (slika 6.6).

Delu krogelnega zrcala številka  $i$ , kateremu ustreza velik  $\vartheta_{ij}$  z majhnim številom enoličnih fotonov, ustreza še dosti nižji sosednji  $\vartheta_{i(j\pm 1)}$  z veliko večjim

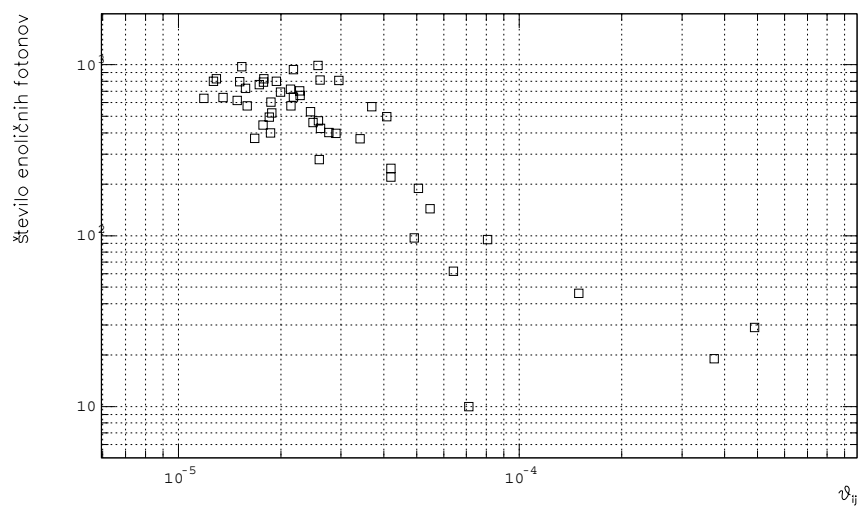


**Slika 6.4:** Primerjava: generirani premiki, popravljene odmiki od idealne lege po prvi ponovitvi in po drugi ponovitvi. Standardna deviacija popravljenih odmikov delov zrcal od idealne lege je po drugi ponovitvi približno  $0.03 \text{ mrad}$ .

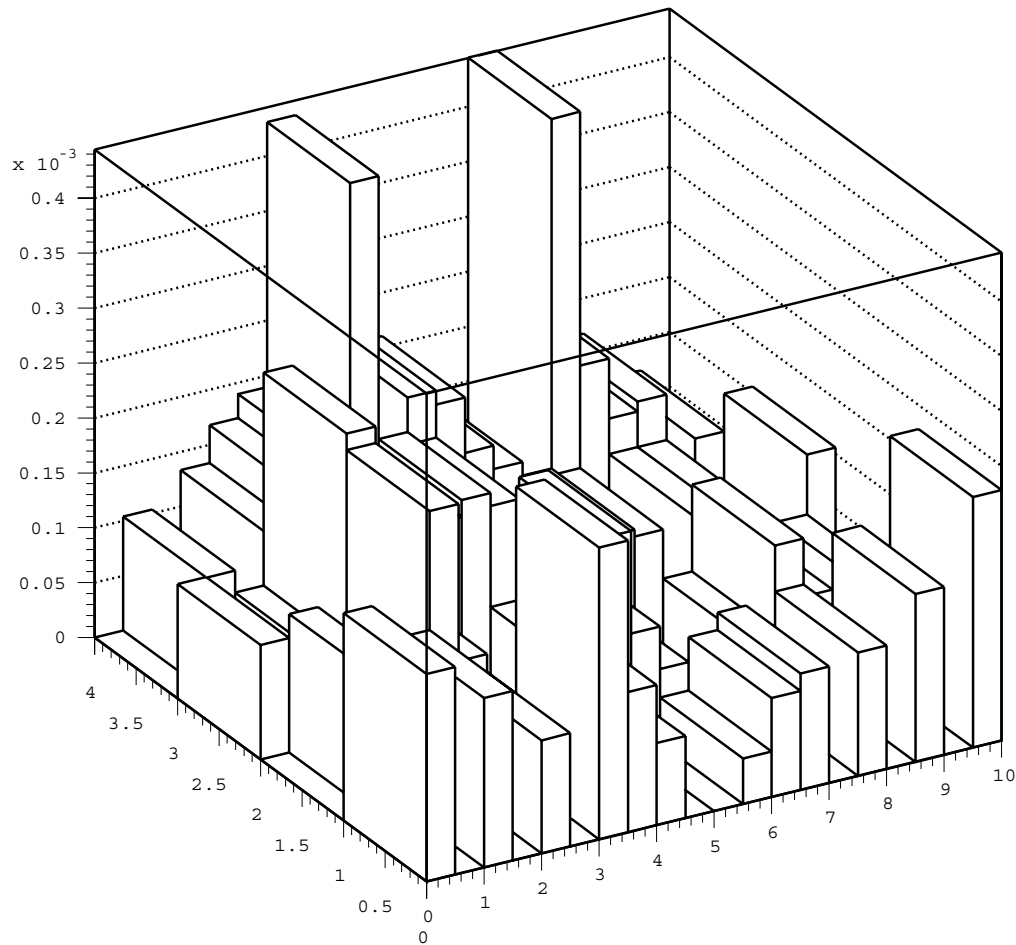
številom enoličnih fotonov (slike 6.9, 6.10 in 6.6). Pri izračunu premika dela krogelnega zrcala številka  $i$  upoštevam manjši stolpec veliko bolj, ker ima več enoličnih fotonov kot večji.



**Slika 6.5:** Primerjava generiranih premikov delov zrcal, popravljenih od mikov od idealne lege po prvi in po drugi ponovitvi postopka za pet različnih primerov. Standardna deviacija porazdelitve popravljenih od mikov od idealne lege po drugi ponovitvi je približno 25 krat manjša kot pri generiranih premikih.

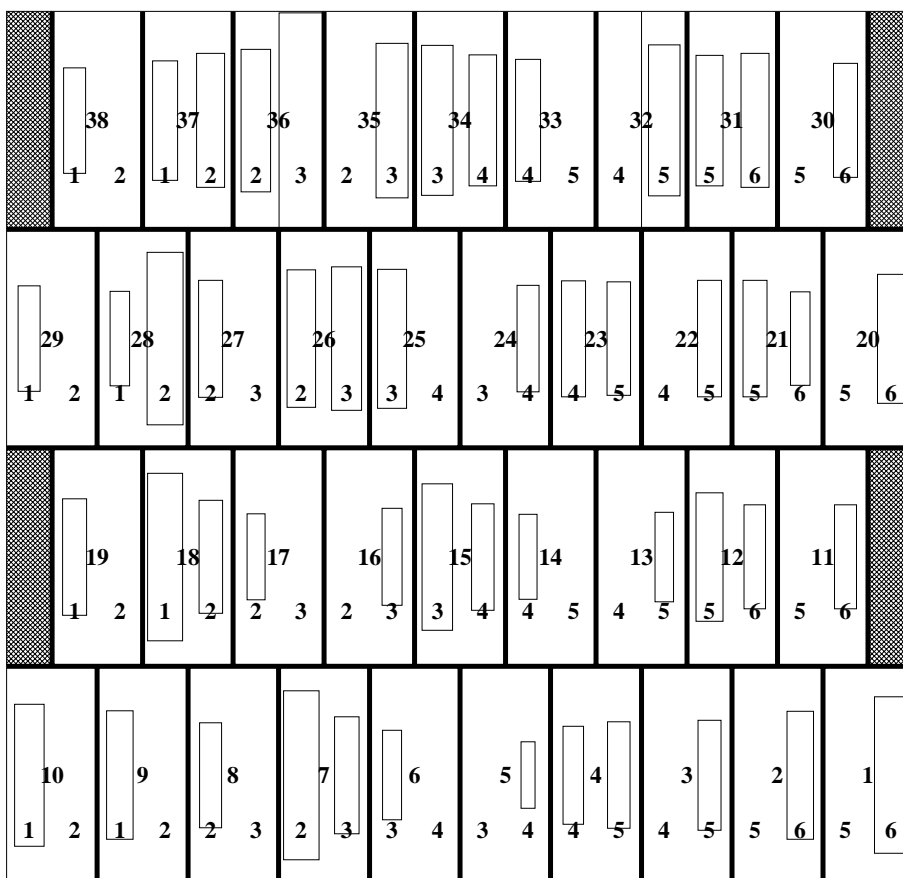


**Slika 6.6:** Povezava med številom enoličnih fotonov, ki so se odbili na delu  $i$  krogelnega zrcala in delu  $j$  ravnega zrcala, in amplitudo napake v določitvi Čerenkovega kota  $\vartheta_{ij}$ . Vsaka točka ustreza enem stolpcu iz slike 6.9. Skoraj vsi enolični fotoni so v intervalu, kjer je amplituda napake v določitvi Čerenkovega kota manjša kot  $0.1 \text{ mrad}$ . Graf je narisani v dvojnem logaritemskem merilu. Visokim stolpcem s slike 6.9 ustreza majhno število enoličnih fotonov.

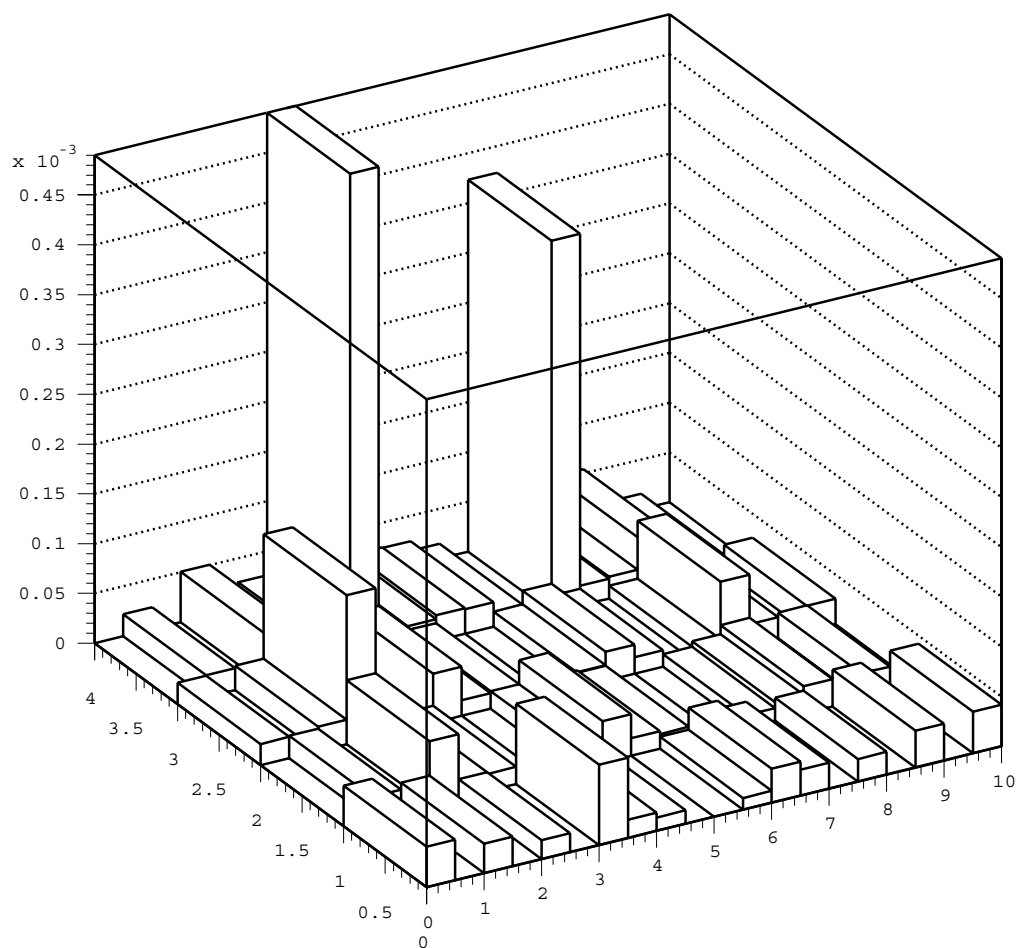


**Slika 6.7:** Povprečna amplituda odmika od Čerenkovega kota na detektorju za dani par delov krognega in ravnega zrcala,  $\vartheta_{ij} = \sqrt{(\vartheta_{ij}^x)^2 + (\vartheta_{ij}^y)^2}$ , po prvi ponovitvi postopka. Višina ustreza napaki v določitvi Čerenkovega kota v radianih. Stolpca v ozadju, ki sta višja kot  $0.4 \text{ mrad}$ , ustrežata paru delov zrcal z zelo slabo statistiko enoličnih fotonov. Deloma krognega zrcala iz danih parov ustrežata tudi dosti nižja sosednja stolpca (glej sliko 6.8). Narisano je povprečje amplitude odkikov za vseh deset primerov generiranih premikov.

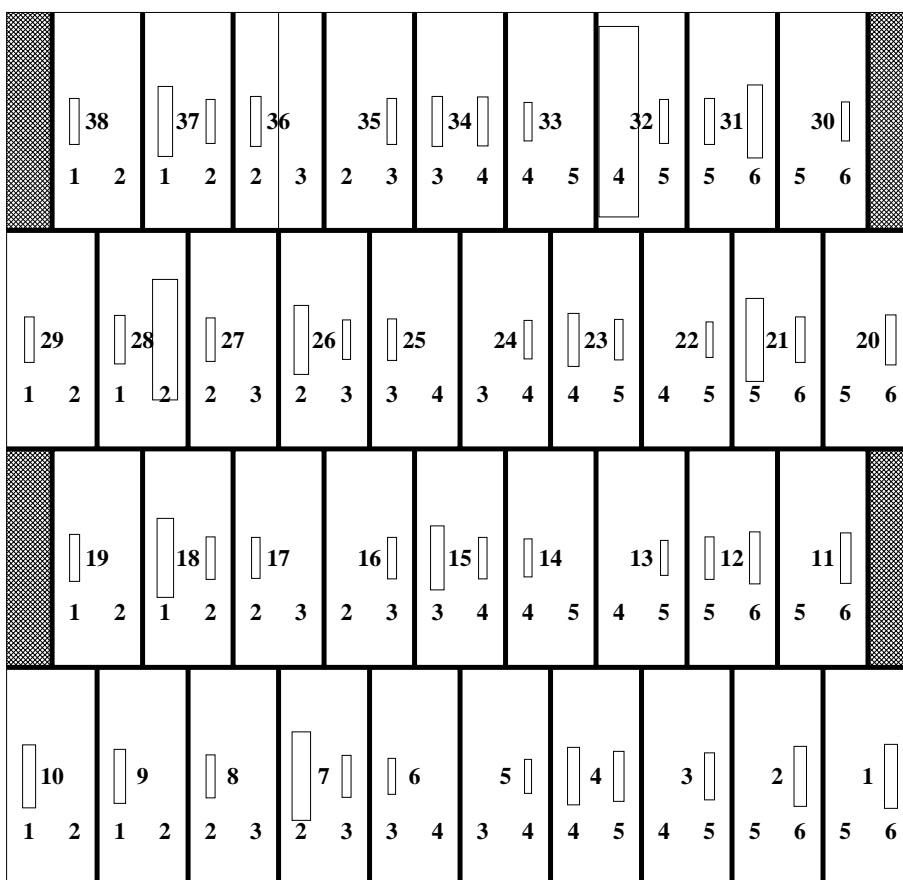




**Slika 6.8:** Amplituda odmikov  $\vartheta_{ij}$  po prvi ponovitvi. Na sredi vsakega pravokotnika, omejenega z debelejšo črto, je napisana zaporedna številka dela krogelnega zrcala (slika 3.4), v spodnjih dveh vogalih pa zaporedna številka ravnega zrcala (slika 3.5). Površina pravokotnikov, omejenih s tanjšo črto, je sorazmerna z višino stolpca na sliki 6.7.



**Slika 6.9:** Povprečna amplituda odklikov od Čerenkovega kota po drugi ponovitvi za vseh deset naborov generiranih premikov delov zrcal. Napake so v vseh primerih manjše kot  $0.1 \text{ mrad}$ , razen za zelo slabo populirane pare delov ogledal (slika 6.6).



**Slika 6.10:** Površina pravokotnikov je sorazmerna s povprečno amplitudo odmikov od Čerenkovega kota po drugi ponovitvi (slika 6.9). Na paru iz dela kroglnega zrcala 36 in iz dela ravnega zrcala 3 (in na paru iz delov 32 in 4) se odbije zelo malo enoličnih fotonov (slika 6.6). Več enoličnih fotonov se odbije na istem delu kroglnega zrcala 36 (32) in na sosednjem delu ravnega zrcala 2 (5).

## 6.2 Realistična porazdelitev nabitih delcev

Delci, ki nastanejo v spektrometru HERA-B, ne letijo izotropno, ampak jih je dosti več v sredini prostorskega kota, ki ga oklepa spektrometer, kot pa na robovih (slika 5.1). Kot vhod v simulacijo sem zato uporabil datoteko, generirano s simulacijskim pakeom GEANT, ki je vsebovala parametre delcev na začetku sevalca detektorja Čerenkovih obročev. Za izračun premikov sem uporabil samo elektrone in pione, ki so imeli gibalne količine večje kot  $2.6 \text{ GeV}/c$ , kar v primeru pionov pomeni, da so sevali Čerenkove fotone pod kotom, ki ni bil manjši kot  $10 \text{ mrad}$ . Ponovno sem privzel, da sta bili standardni deviaciji začetnih odmikov krogelnih in ravnih zrcal ( $\sigma_\alpha$  in  $\sigma_\beta$ ) enaki  $1 \text{ mrad}$  in  $2 \text{ mrad}$ . Standardna deviacija amplitude odmikov od Čerenkovega kota je tako približno ( $a \approx 2, b \approx 1$ ):

$$\sigma_{\vartheta_{ij}} = \sqrt{(a\sigma_{\alpha_i})^2 + (b\sigma_{\beta_j})^2} \sim 3 \text{ mrad}. \quad (6.1)$$

Približek 4.2 v prvem poskusu ne opiše najbolj izmerjenega Čerenkovega kota  $\vartheta_{ch}$  kot funkcijo  $\varphi_{ch}$  ( $3 \text{ mrad} \ll 10 \text{ mrad}$ ). V naslednjih poskusih se amplituda odmika od Čerenkovega kota zmanjša (po prvem popravku je  $\sim 0.5 \text{ mrad} \ll 10 \text{ mrad}$ ), tako da je 4.2 upravičen približek za izmerjeno porazdelitev.

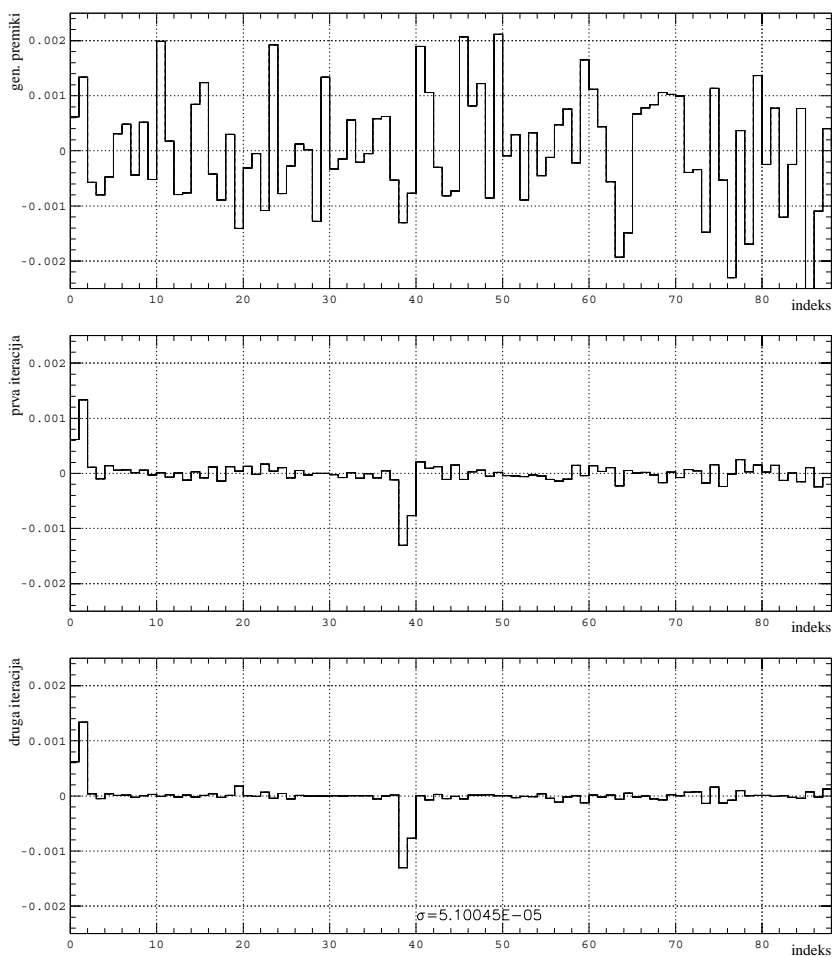
V primeru realistične porazdelitve sem generiral Čerenkove fotone za 50000 delcev, ki so ustrezali zgornjim kriterijem. To je pomenilo približno 50000 enoličnih fotonov, ki so zadeli zgornji detektor.

Pri dveh delih krogelnega zrcala sploh nisem dobil nobenega enoličnega fotona (dela številka 1 in številka 20), zato ju nisem mogel pravilno nastaviti. Ta dva dela sta čisto na robu prostorskega kota HERA-B (slika 3.4). Ker so gibalne količine pionov, katerih fotoni zadenejo ta robna zrcala, nizke, so zahteve za ločljivost bistveno manjše. Zato je pravilna nastavitve robnih zrcal veliko manj pomembna. Z večjo statistiko delcev, ki vstopajo v sevalec, bi lahko določil tudi odmike teh dveh delov krogelnega zrcala. Pri računu odstopanja popravljenih odmikov po drugi ponovitvi odmikov teh dveh delov nisem upošteval.

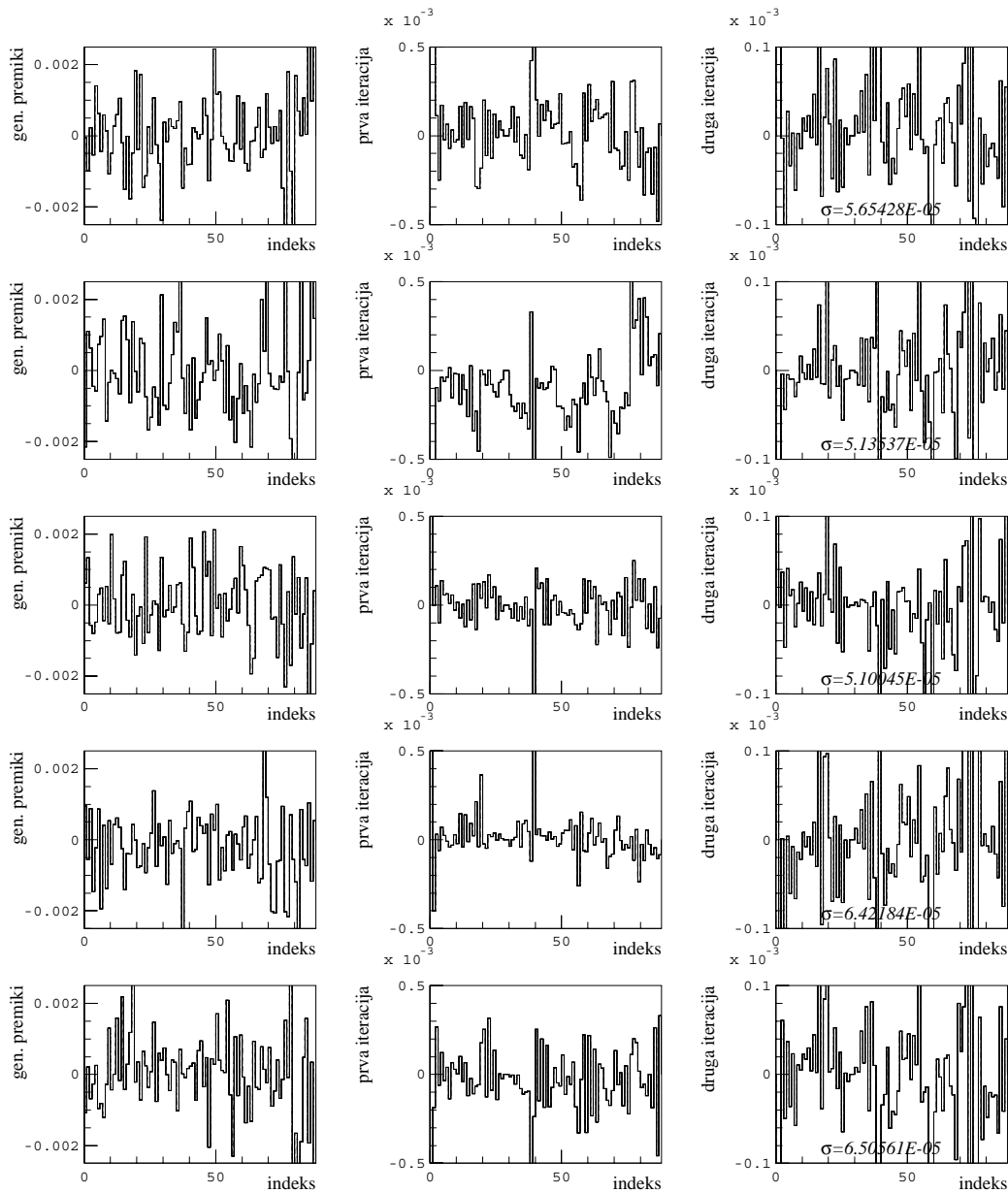
Postopek sem ponovil dvakrat. Po drugi ponovitvi so bile standardne deviacije popravljenih premikov zrcal približno  $0.05 \text{ mrad}$ . (slika 6.11).

Prav tako kot pri izotropni porazdelitvi delcev sem primerjal rezultate za deset različnih naborov generiranih premikov delov zrcal. Na sliki 6.12 sem predstavil pet izmed njih.

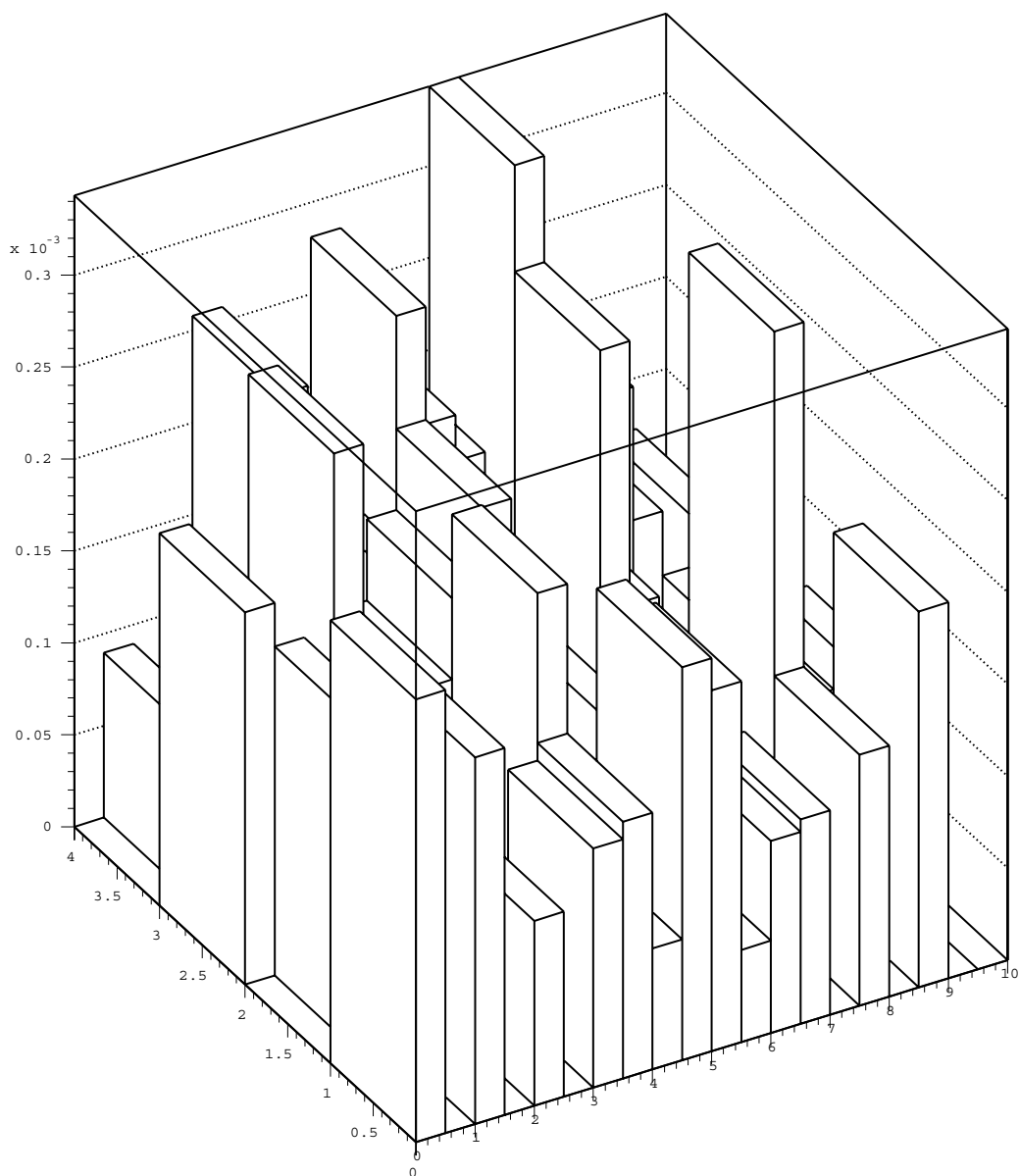
Pogledal sem tudi, kakšna je napaka pri določitvi Čerenkovega kota na detektorju po prvi in po drugi ponovitvi. Napako v Čerenkovem kotu sem risal za pare delov krogelnega zrcala in ravnega zrcala v dvodimenzionalnem histogramu.



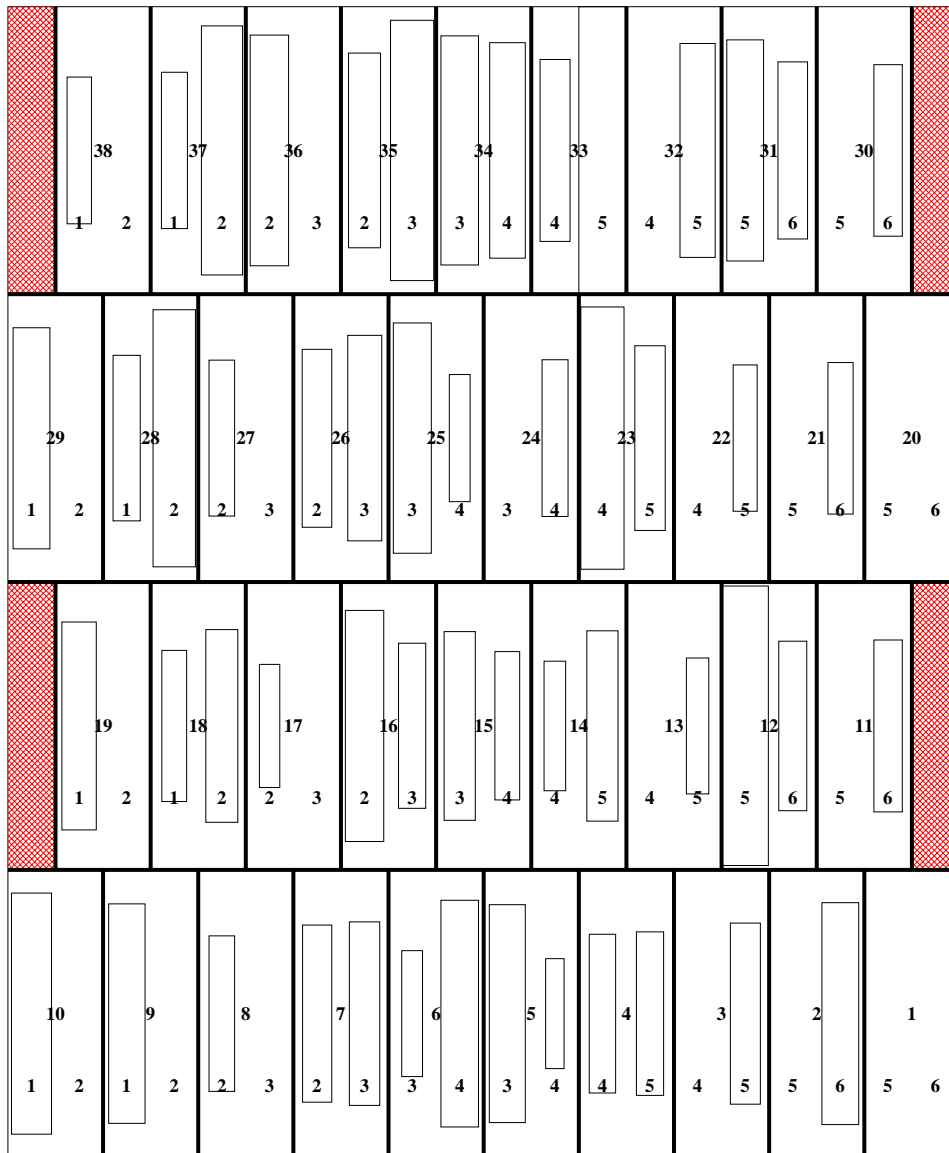
**Slika 6.11:** Primerjava: generirani premiki, odmiki od idealne lege po prvi ponovitvi in po drugi ponovitvi. Standardna deviacija odklikov delov zrcal od idealne lege je po drugi ponovitvi približno  $0.05 \text{ mrad}$ , če ne upoštevam dveh delov krogelnega zrcala (številka 1 in 20), ki mi jih ni uspelo naravnati.



**Slika 6.12:** Generirani premiki (prvi stolpec), odmiki po prvi ponovitvi (drugi stolpec) in po drugi ponovitvi (tretji stolpec). Narisanih je prvih pet naborov generiranih premikov. Navpična skala pri prvi ponovitvi je 5 krat, pri drugi ponovitvi pa 25 krat manjša kot pri generiranih premikih.

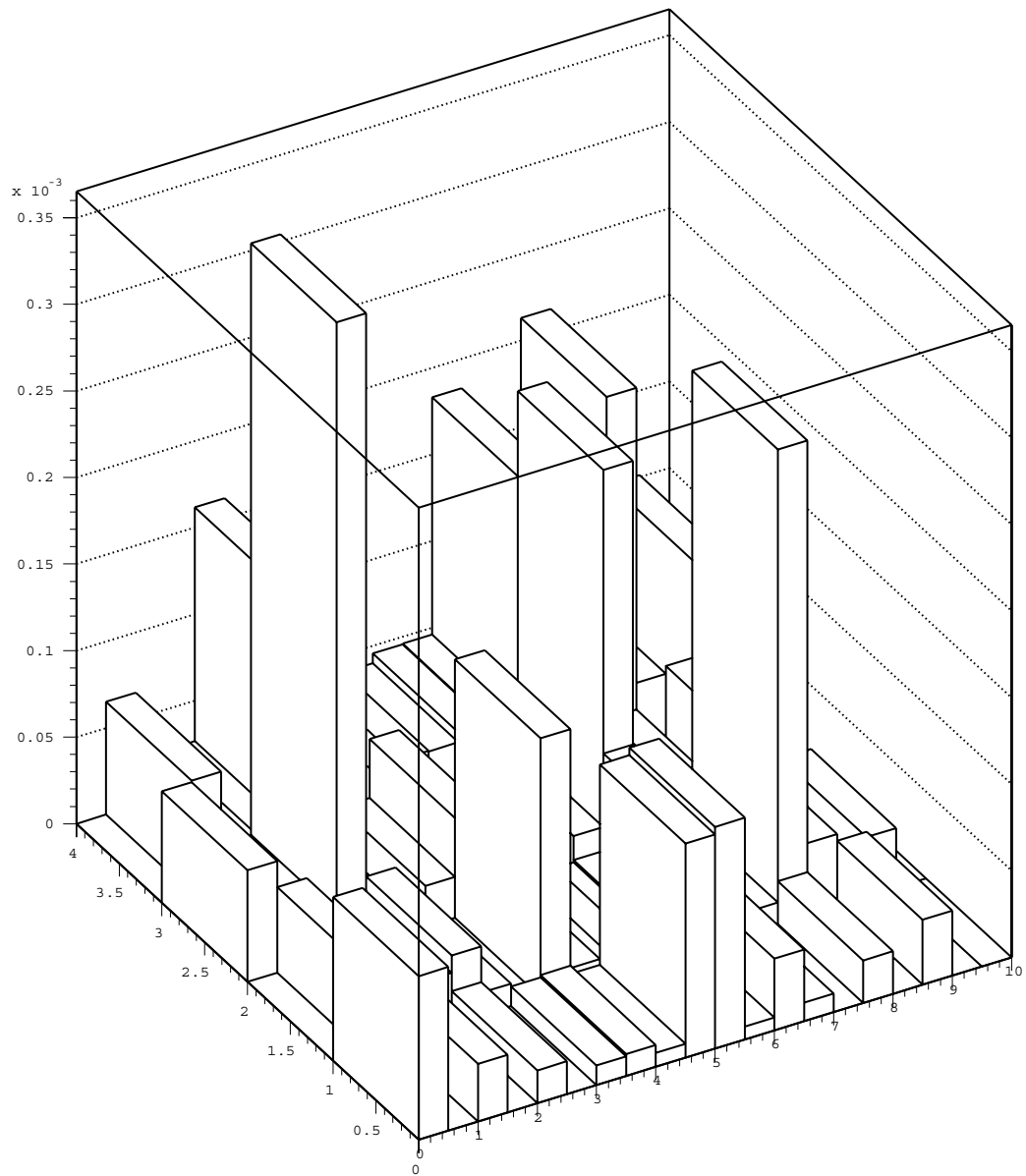


**Slika 6.13:** Višina stolpcov je enaka povprečni amplitudi odklona od Čerenkovega kroga na detektorju za dani par iz dela  $i$  krogelnega in dela  $j$  ravnega zrcala,  $\vartheta_{ij} = \sqrt{(\vartheta_{ij}^x)^2 + (\vartheta_{ij}^y)^2}$ , po prvi ponovitvi postopka. Stolpci, ki so izrazito višji od ostalih, ustrezajo parom delov zrcal s slabo statistiko enoličnih fotonov (slika 6.6). Delom krogelnega zrcala iz danih parov ustrezajo še dosti nižji sosednji stolpci (slika 6.14).

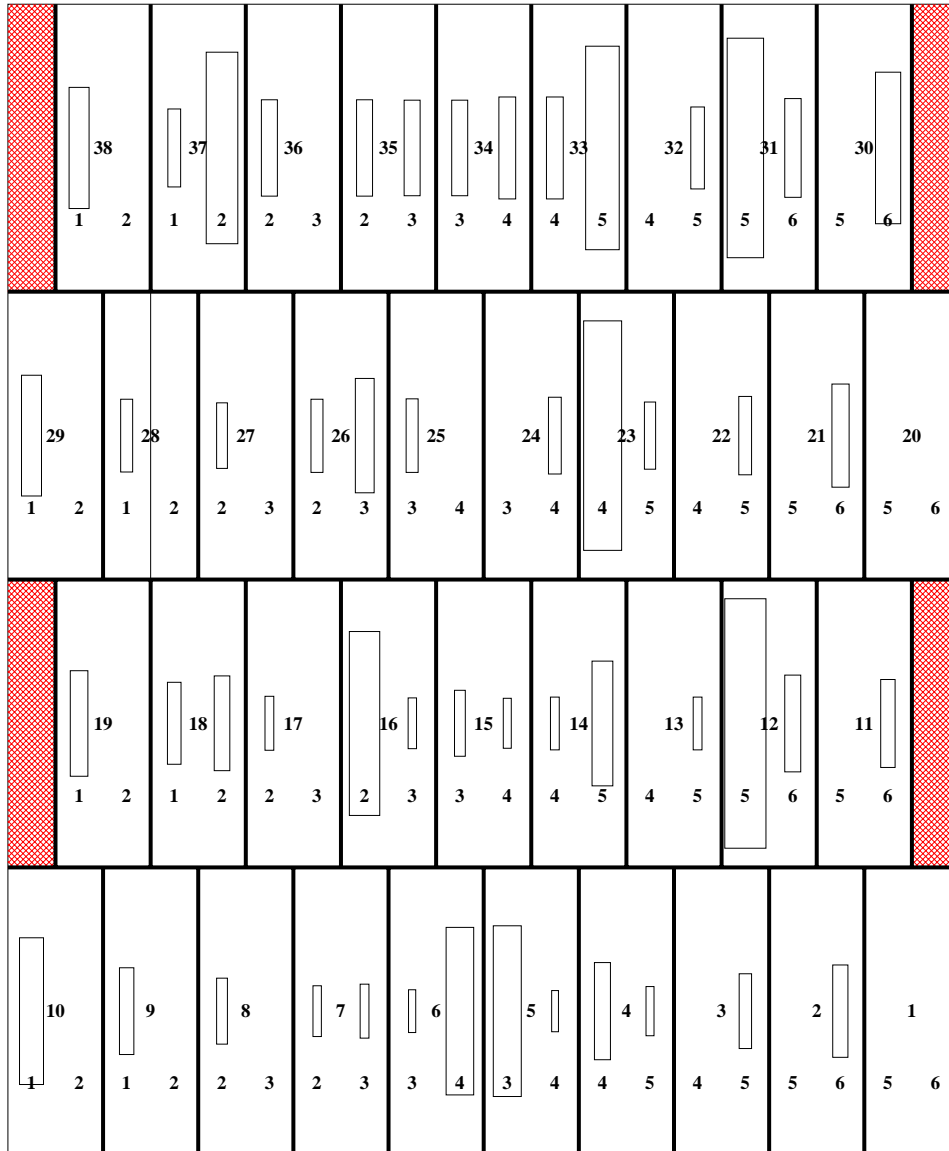


**Slika 6.14:** Površina pravokotnikov je sorazmerna z višino stolpcev na sliki 6.13. Na sredi vsakega pravokotnika, omejenega z debelo črto, je napisana zaporedna številka dela krogelnega zrcala (slika 3.4), v spodnjih dveh vogalih pa zaporedna številka dela ravnega zrcala (slika 3.5). Vidi se, da je pri vsakem delu krogelnega zrcala vsaj en majhen pravokotnik, razen za dela številka 1 in 20, kjer se pri danem naboru delcev ne odbije noben enoličen foton.





**Slika 6.15:** Povprečna amplituda odmika od Čerenkovega kota po drugi ponovitvi. Večina stolpcev je pod  $0.1 \text{ mrad}$ .



**Slika 6.16:** Površina pravokotnikov je sorazmerna z višino stolpcev na sliki 6.15. Večji stolpci s slike 6.15 imajo praviloma majhnega soseda. Del kroglnega zrcala se lahko prekriva z dvema različnima deloma ravnega zrcala, z enim veliko z drugim pa malo.

## 6.3 Umeritev pri velikem ozadju

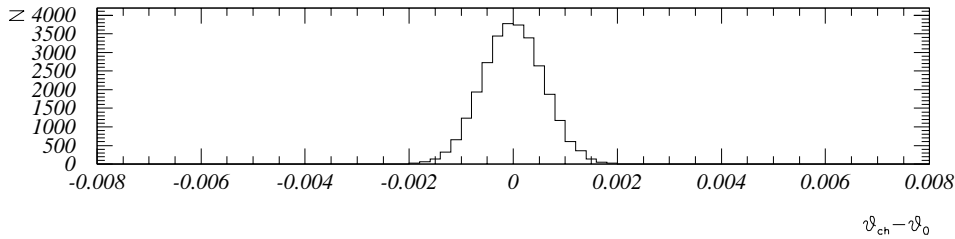
V prejšnjih poglavjih sem za umeritev optičnega sistema uporabil izolirane nabite delce. To so taki delci, ki so sevali Čerenkove fotone v obroč na detektorju, ki se ni prekrival z obroči drugih delcev. V tem primeru nastopajo v porazdelitvi rekonstruiranih Čerenkovih kotov  $\vartheta_{ch}$  okoli Čerenkovega kota  $\vartheta_0$ , izračunanega po enačbi 1.3, samo pravi Čerenkovi fotoni (slika 6.17(a)).

Pri normalno populiranih dogodkih predstavlja velik problem ločevanje fotonov, ki pripadajo danemu delcu, od fotonov, ki pripadajo ostalim delcem. Ti ostali fotoni so glavni prispevek k ozadju (sliki 6.17(b) in 6.17(c)). S simulacijo so določili porazdelitev fotonov na detektorju, ki pripadajo ozadju (slika 6.19 [13]).

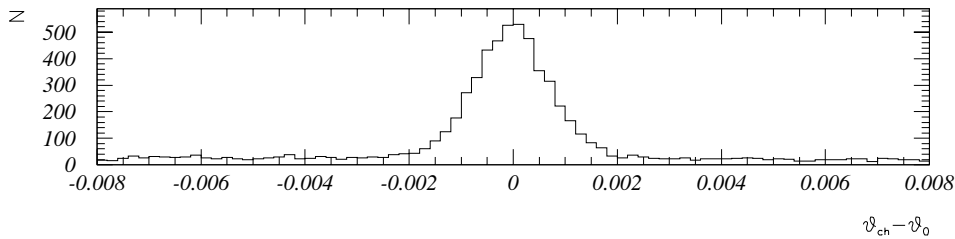
Sliko iz detektorja bodo zajemali ob vsakem preletu gruče protonov iz protonskega žarka skozi tarčo. Povprečno bo ob vsakem preletu gruče nastalo 350 delcev. Polovica od teh bo v povprečju sevala Čerenkove fotone na zgornji detektor (slika 6.18). V primeru  $\beta = 1$  delcev to pomeni za dani sevalec približno 5000 fotonov na detektorju ob vsakem preletu gruče, ki bi imeli približno tako porazdelitev, kot je na sliki 6.19.

Fotoni ozadja so porazdeljeni približno linearno po Čerenkovem kotu (obseg Čerenkovega obroča je sorazmeren s Čerenkovim kotom). Kot prvi približek sem za to porazdelitev na intervalu med  $\vartheta_0 - 8 \text{ mrad}$  in  $\vartheta_0 + 8 \text{ mrad}$  vzel kar enakomerno porazdelitev. Širina omenjenega intervala ustreza  $20\sigma$  porazdelitve Čerenkovih fotonov okoli Čerenkovega kota za izoliran delec.

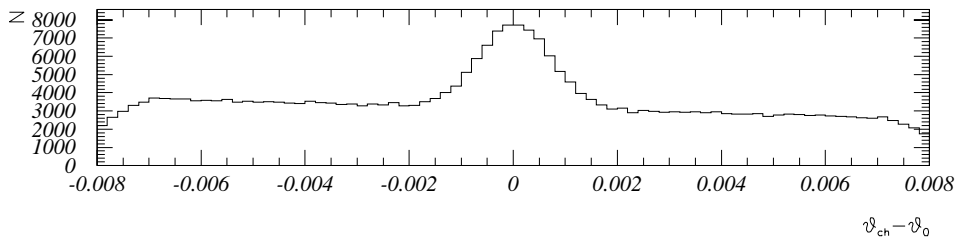
Generiral sem 50000 pionov in elektronov z gibalnimi količinami večjimi od  $2.6 \text{ GeV}/c$ , ki so sevali Čerenkove fotone. Za vsak delec sem generiral Čerenkove fotone, ki so bili porazdeljeni okoli Čerenkovega kota po Gaussovi porazdelitvi s  $\sigma = 0.63 \text{ mrad}$ . Poleg teh fotonov sem generiral še fotone ozadja, ki so bili porazdeljeni enakomerno okoli Čerenkovega kota po intervalu s širino  $20\sigma$ . Število fotonov ozadja, ki sem jih generiral na en nabiti delec, je bilo določeno s porazdelitvijo s slike 6.19. Za delce, ki so leteli pod majhnim kotom glede na protonski žarek, sem generiral do  $\sim 300$  (slika 6.17(c)) fotonov ozadja na delec, za tiste, ki so sevali Čerenkove fotone na rob detektorja, pa ustrezno manj (slika 6.17(b)). Prekrivanje obročev je namreč večje tam, kjer je obročev več.



(a) Primer, ko izberemo samo osamljene delce.



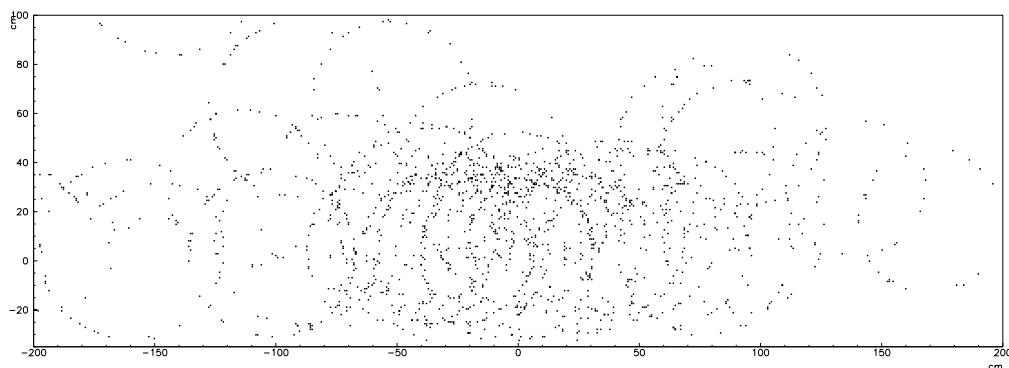
(b) Porazdelitev enoličnih fotonov, ki so se odbili na robu kroglnega zrcala.



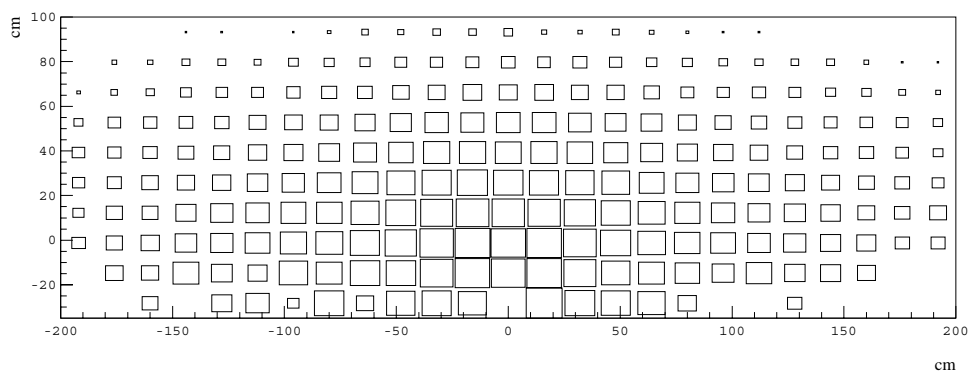
(c) Porazdelitev enoličnih fotonov, ki so se odbili na sredini kroglnega zrcala (deli 4 do 7 in 14 do 16)

**Slika 6.17:** Porazdelitev izmerjenega Čerenkovovega kota: Na sliki (a) je narisana primer za osamljen delec, na slikah (b) in (c) pa primer, ko je število fotonov ozadja porazdeljeno kot na sliki 6.19.

Pri določanju odmikov delov zrcal od idealne lege sem za vsak par delov kroglnega in ravnega zrcala razdelil področje  $\varphi_{ch}$  in  $\vartheta_{ch}$  na  $30 \times 30$  delov. Ta dvodimenzionalni histogram sem napolnil s številom fotonov, katerih rekonstruirana Čerenkov kot  $\vartheta_{ch}$  in polarni kot okoli poti delca  $\varphi_{ch}$  sta ustrezala danemu intervalu. Od vsakega histograma sem odštel ozadje sorazmerno z višino največjega elementa histograma (slika 6.20). To pomeni, da sem od vsakega elementa histograma odštel to vrednost, če pa je bila vrednost po odštevanju manjša kot 0, sem jo postavil na 0. Interval  $\vartheta_{ch}$  sem s številom ponovitev ožil. Pri prvi ponovitvi je histogram vseboval interval  $\vartheta_{ch}$  med  $\vartheta_0 - 7.5 \text{ mrad}$  in



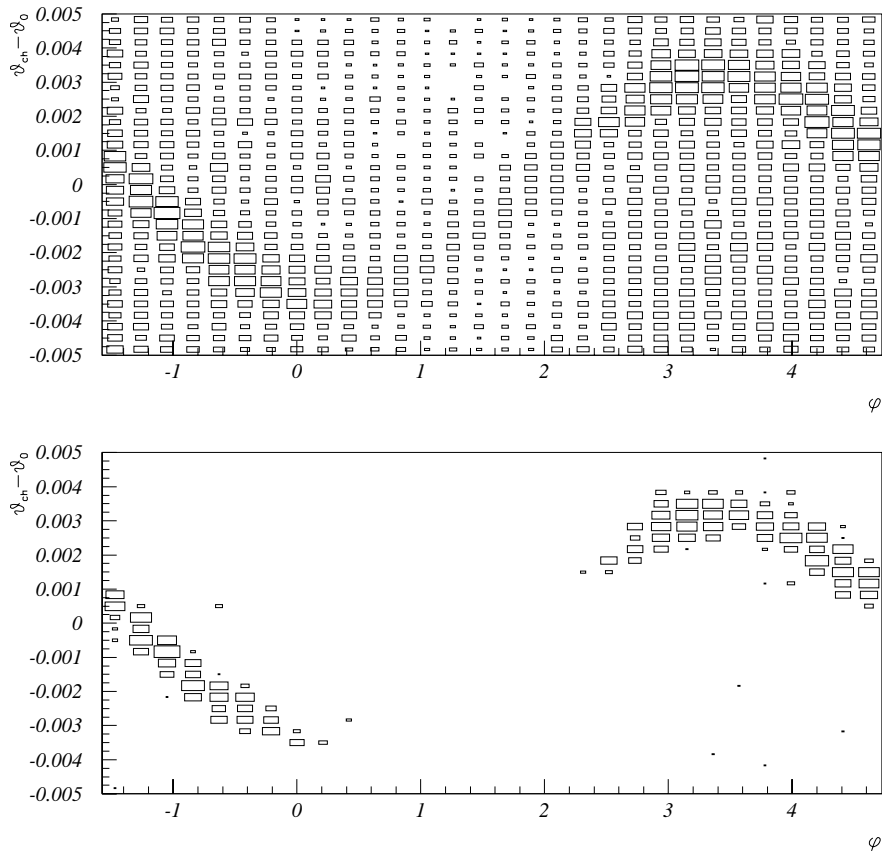
**Slika 6.18:** Koordinati (v *cm*) zadetkov fotonov na zgornjem detektorju ob enem preletu gruče protonov. (0,0) je točka, ki jo zadenejo fotoni, katerih smeri so vzporedne s protonskim žarkom.



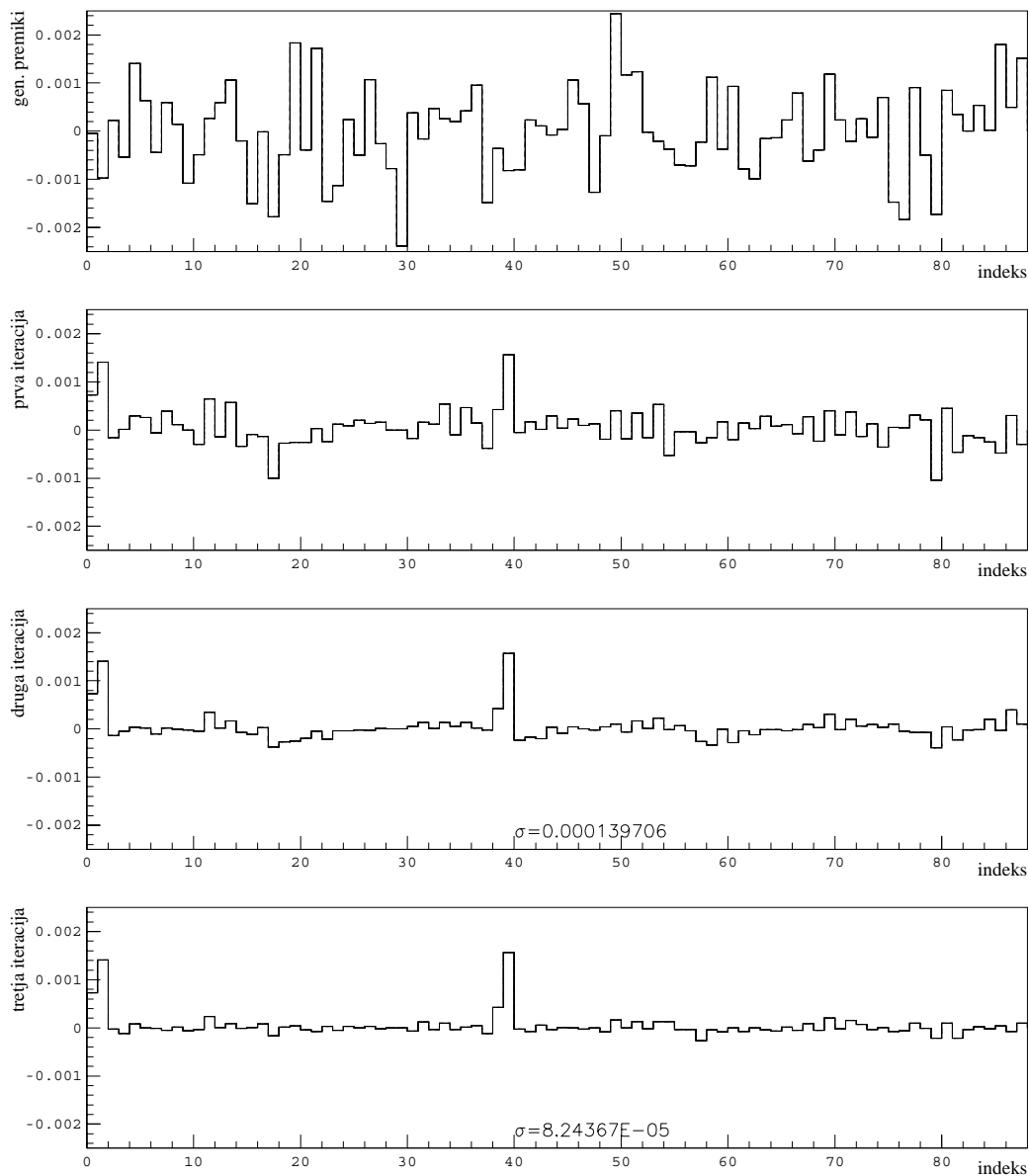
**Slika 6.19:** Porazdelitev števila fotonov ozadja na nabiti delec po zgornjem detektorju. Ozadja je več na sredini, kjer je prekrivanje med obroči fotonov veliko.

$\vartheta_0 + 7.5 \text{ mrad}$ , pri drugi ponovitvi pa med  $\vartheta_0 - 2.5 \text{ mrad}$  in  $\vartheta_0 + 2.5 \text{ mrad}$ , kjer je  $\vartheta_0$  Čerenkov kot izračunan po enačbi 1.3. Za dele krogelnega zrcala v sredini (4 – 7 in 14 – 16) sem za nivo ozadja vzel 0.4 največjega elementa v histogramu, drugače pa sem za nivo ozadja vzel 0.2 največjega elementa v histogramu. Kot primer sem narisal histogram za par iz dela krogelnega zrcala številka 4 in dela ravnega zrcala številka 4 (slika 6.20).

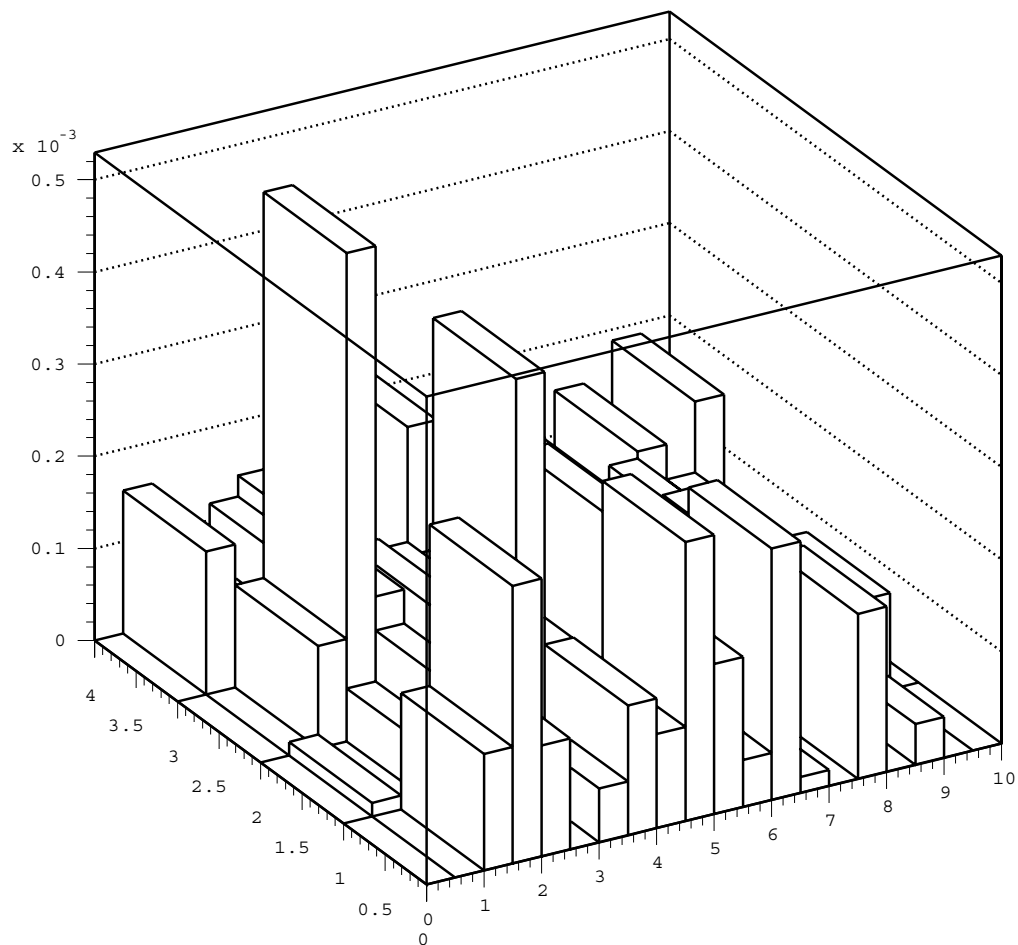
Ker so bili odmiki zrcal od idealne lege po drugi ponovitvi še vedno preveliki ( $\sigma \approx 0.14 \text{ mrad}$ ), sem postopek ponovil še tretjič. Po tretji ponovitvi je bila standardna deviacija odklikov zrcal že manjša od  $0.1 \text{ mrad}$ . Po četrti ponovitvi se standardna deviacija porazdelitve odklikov delov zrcal od idealne lege ni zmanjšala več veliko (iz  $\sigma \approx 0.082 \text{ mrad}$  na  $\sigma \approx 0.081 \text{ mrad}$ ).



**Slika 6.20:** Na zgornjem grafu je predstavljen dvodimenzionalni histogram, preden sem odstranil ozadje, na spodnjem pa potem, ko sem elementom odštel ozadje višine 0.4 maksimalne vrednosti. Predstavljen je primer za par iz dela krogelnega zrcala številka 4 in ravnega številka 4.

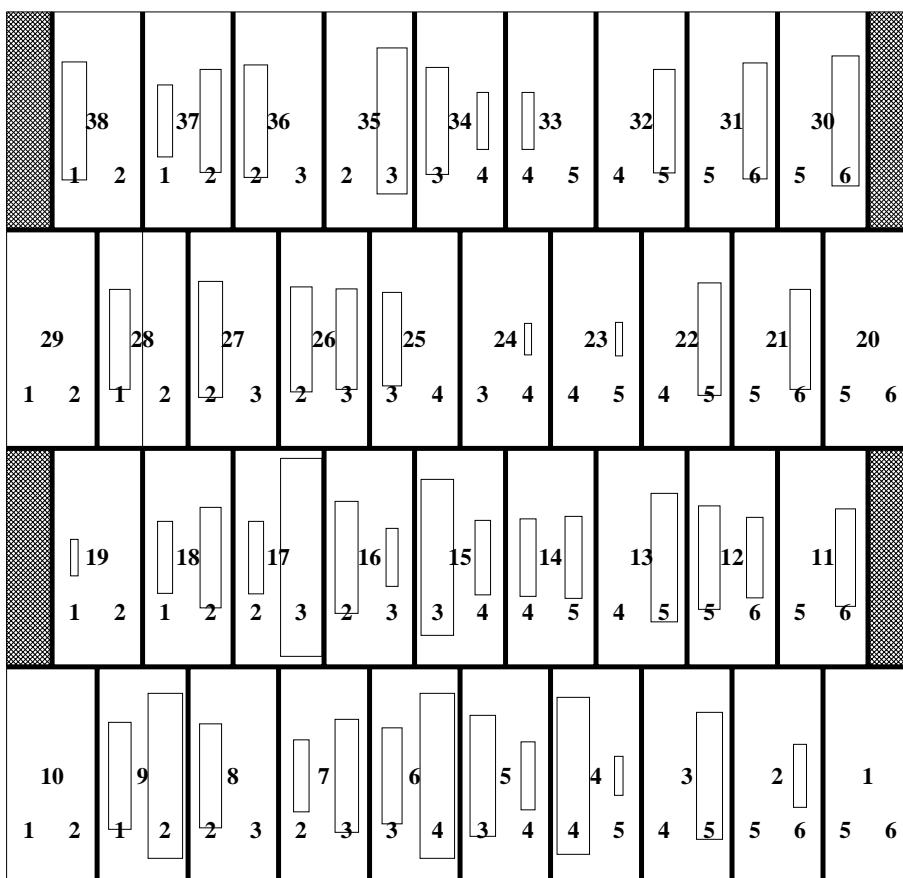


**Slika 6.21:** Primerjava generiranih premikov delov zrcal z njihovimi popravljenimi odmiki od idealne lege po prvi ponovitvi, po drugi ponovitvi in po tretji ponovitvi. Standardna deviacija odmikov delov zrcal od idealne lege je po drugi ponovitvi še vedno večja od 0.1 *mrad*, po tretji pa je približno 0.08 *mrad*. Kljub temu je porazdelitev fotonov po  $\vartheta_{ch} - \vartheta_0$  že po prvi ponovitvi blizu idealni (slika 6.24).



**Slika 6.22:** Amplituda odmikov od Čerenkovega kota,  $\vartheta_{ij} = \sqrt{(\vartheta_{ij}^x)^2 + (\vartheta_{ij}^y)^2}$ , po treh ponovitvah. Visoki stolpci predstavljajo pare delov zrcal s slabo statistiko enoličnih fotonov in so zato slabo določeni.



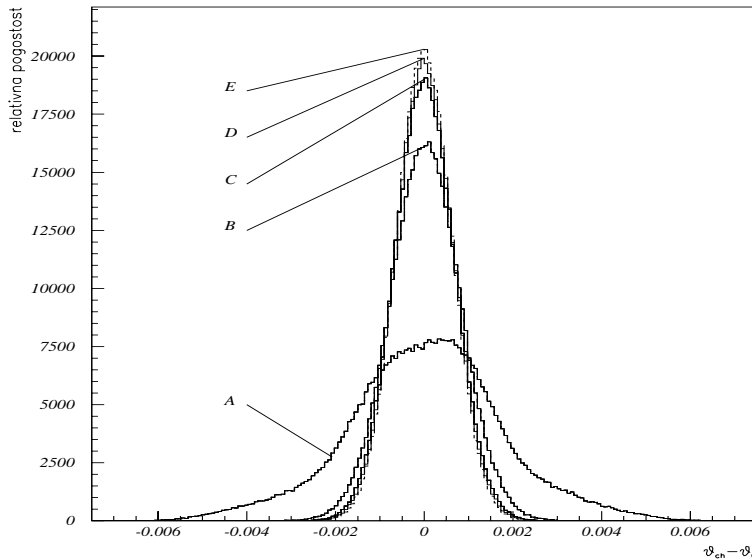


**Slika 6.23:** Amplituda odmika od Čerenkovskega kota po tretji ponovitvi. Površina pravokotnikov je sorazmerna z višino stolpcev na sliki 6.22. Diagram je narisano samo za en primer začetnih generiranih premikov. V tem primeru se tudi na delih 10 in 29 krogelnega zrcala ni odbil noben enoličen foton.

## 6.4 Napaka v meritvi Čerenkovega kota

Za primer realistične porazdelitve delcev pri velikem ozadju (slika 6.21) sem za vsak foton izračunal razliko med izmerjenim,  $\vartheta_{ch}$ , in pravim Čerenkovim kotom,  $\vartheta_0$  (slika 6.24). V primeru, ko so premiki delov zrcal porazdeljeni po Gaussovi porazdelitvi ( $\sigma_{\alpha_x} = \sigma_{\alpha_y} = \sigma_{\beta_x} = \sigma_{\beta_y} = 1 \text{ mrad}$ ), je standardna deviacija porazdelitve enaka,  $\sigma_A = 1.76 \text{ mrad}$ . Po prvi, drugi in tretji ponovitvi postopka se porazdelitev vedno bolj bliža porazdelitvi fotonov, ki bi jo dobili pri idealnem optičnem sistemu. Standardna deviacija porazdelitve po tretji ponovitvi je  $\sigma_D = 0.650 \text{ mrad}$ , standardna deviacija idealne porazdelitve pa je  $\sigma_E = 0.630 \text{ mrad}$ . Prispevek zaradi napačne nastavitve zrcal k skupni standardni deviaciji porazdelitve je tako  $\sigma_{\vartheta}^{os} = \sqrt{\sigma_D^2 - \sigma_E^2} = 0.16 \text{ mrad}$ .

Generirani vzorec smeri delcev v datoteki, ki sem jo uporabil ustreza številu delcev, ki jo bomo v resničnem poskusu zbrali v času približno  $1 \text{ min}$ . Pri daljši meritvi se bo nabralo ustrezno več delcev, kar bo izboljšalo natančnost nastavitve optičnega sistema.



**Slika 6.24:** Razlika izmerjenega in pravega Čerenkovega kota,  $(\vartheta_{ch} - \vartheta_0)$ , za vse prave Čerenkove fotone, ki smo jih usmerili z optičnim sistemom. Širša porazdelitev A ustreza neumerjenemu optičnemu sistemu. Porazdelitve B, C in D ustrezajo prvi, drugi in tretji ponovitvi, porazdelitev E pa bi dobili, če bi bili vsi deli zrcal idealno postavljeni.

## 7. poglavje

### Zaključek

V svojem diplomskem delu sem razvil metodo, ki jo lahko uporabim za nastavitve optičnega sistema, ki je sestavljen iz dveh zaporednih sistemov zrcal.

Metodo bomo uporabili za sprotno preverjanje nastavitve oziroma za umeritev optičnega sistema detektorja Čerenkovih obročev v spektrometru HERA-B v institutu DESY.

Kot preizkus sem sistem zrcal umeril s simuliranimi Čerenkovimi fotoni. Natančnost v določitvi Čerenkovega kota bo za detektor Čerenkovih fotonov spektrometra HERA-B približno  $\sigma_{\theta} = 0.63 \text{ mrad}$ . V diplomski nalogi sem pokazal, da se da sistem zrcal umeriti tako, da je napaka zaradi napačne postavitve zrcal za velikostni red manjša od te vrednosti.

Optični sistem sem najprej poskušal nastaviti s Čerenkovimi fotoni delcev, ki so bili izotropno porazdeljeni po prostorskem kotu HERA-B. V tem primeru optični sistem umerim do željene natančnosti ( $\approx 0.1 \text{ mrad}$ ) po dveh ponovitvah postopka.

Tudi v primeru, ko so delci porazdeljeni realistično po prostorskem kotu HERA-B, optični sistem umerim na željeno natančnost v dveh ponovitvah. Umeriti mi ni uspelo dveh skrajnih delov krogelnega zrcala, ker se na njiju ni odbil noben enolični foton.

Tudi v primeru velikega ozadja, ki ga povzroči prekrivanje Čerenkovih obročev na detektorju, mi je uspelo optični sistem umeriti, tako da je bila napaka, povzročena zaradi odmikov delov zrcal od idealne lege manjša od  $0.2 \text{ mrad}$ . Natančnost umeritve bi lahko povečal, če bi generiral delce z večjo statistiko, kar ustreza daljšemu času meritve. Velja omeniti, da bodo pri normalnem zajemanju podatkov takšen vzorec nabrali že v eni minuti.



# Literatura

- [1] P. Križan et al., HERA-B, an experiment to study CP violation at the HERA proton ring using an internal target, Nucl. Instr. and Meth. A351 (1994) 111-131.
- [2] T. Lohse et al., HERA-B, An Experiment to Study CP Violation in the B System Using an Internal Target at the HERA Proton Ring, DESY-PRC 94/02, May 1994
- [3] E. Fokitis, et al., The Fabry-Perot Interferometer for the DELPHI Ring Imaging Cherenkov Detector, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 44 (1995) 246-251.
- [4] J. V. Jelley, Čerenkov radiation and its applications, Pergamon Press, London, 1958.
- [5] P. Križan, M. Starič, The optimal detector surface of a fixed target RICH with tilted mirror, Nucl. Instr. and Meth. A (1996) 124-129.
- [6] T. Ypsilantis, J. Seguinot, Theory of ring imaging Cherenkov counters, Nucl. Instr. and Meth. A343 (1994) 30-50
- [7] Hamamatsu data-sheet: R5900U, junij 1996
- [8] J. D. Jackson, Classical Electrodynamics, Second Edition, John Wiley & Sons, New York 1975.
- [9] R. J. Apsimon et al., Nucl. Instr. and Meth. 241 (1985) 339
- [10] Specification for Spherical HERA-B RICH Mirrors, 30 August, 1996
- [11] S. Korpar, Razvoj, izdelava in preizkus detektorja Čerenkovih obročev, disertacija, Ljubljana, 1997

- [12] William H. Press, et al., Numerical Recipes, Cambridge University Press, Cambridge, 1990
- [13] P. Križan, T. Živko, IJS Report, IJS-DP-7456, septmber 1996.