

MITJA PREDIKAKA

KARAKTERIZACIJA MODULOV ZA DETEKTOR OBROČEV  
ČERENKOVA PRI SPEKTROMETRU BELLE II





UNIVERZA V LJUBLJANI  
FAKULTETA ZA MATEMATIKO IN FIZIKO  
ODDELEK ZA FIZIKO

MITJA PREDIKAKA

KARAKTERIZACIJA MODULOV ZA  
DETEKTOR OBROČEV ČERENKOVA PRI  
SPEKTROMETRU BELLE II

Magistrsko delo

MENTOR: doc. dr. Rok PESTOTNIK

Ljubljana, 2015





---

IZJAVA O AVTORSTVU IN OBJAVI ELEKTRONSKE OBLIKE

---

Izjavljam:

- A. da sem magistrsko delo z naslovom Karakterizacija modulov HAPD za detektor obročev Čerenkova pri spektrometru Belle II izdelal samostojno pod mentorstvom doc. dr. Rok Pestotnika,
- B. da je elektronska oblika dela identična s tiskano obliko in
- C. da Fakulteti za matematiko in fiziko Univerze v Ljubljani dovoljujem objavo elektronske oblike svojega dela na spletnih straneh Repozitorija Univerze v Ljubljani.

Ljubljana, dne

Podpis:

---

Mitja Predikaka



---

## POVZETEK

---

Za ločevanje pionov in kaonov bo v spektrometru Belle II uporabljen detektor obročev Čerenkova brez fokusirnega sistema zrcal. Sestavljen bo iz sevalca iz aerogela, prostora za razširjanje obročev Čerenkova, pozicijsko občutljivih fotonских sensorjev HAPD in čitalne elektronike. V magistrskem delu je opisana aparatura, s katero bodo pred vgradnjo preverili delovanje vseh 420 modulov fotonских detektorjev HAPD. Opisane so štiri standarne meritve (umeritev elektronike, meritve števila sunkov v odvisnosti od praga diskriminacije, meritve časovne odvisnosti velikosti signala in meritve pozicijske občutljivosti) in predstavljeni rezultati za pet fotonских sensorjev.

KLJUČNE BESEDE: sevanje Čerenkova, detektor obročev Čerenkova, identifikacija delcev, fotonский sensor, HAPD

---

## ABSTRACT

---

Proximity focusing Ring Imaging Cherenkov detector will be used as a particle identification system for kaons and muons in the forward endcap region of future Belle II spectrometer. It will consist of aerogel radiator, empty space for expansion of Cherenkov rings, array of position sensitive photon detectors and readout electronics. This thesis describes construction of a test apparatus that will be used to examine all 420 HAPD photon detector modules prior to the installation. Described are standard measurements (calibration of electronics, threshold scan, waveform scan and position sensitivity scan). Results for 5 samples are presented and discussed.

KEYWORDS: Cherenkov radiation, Ring Imaging Cherenkov detector, particle identification, photon detector, HAPD



Zahvaljujem se prof. dr. Petru Križanu, ki me je s svojimi predavanji na 2. stopnji bolonjskega študija fizike navdušil za eksperimentalno fiziko osnovnih delcev. Za napotke, nasvete in obilico pomoči pri izdelavi magistrskega dela se zahvaljujem mentorju doc. dr. Roku Pestotniku in prof. dr. Samu Korparju. Brez njiju bi bilo zadnje leto veliko težje, kot je bilo. Najlepša hvala tudi Elvedinu Tahiroviču in dr. Roku Dolencu za pomoč pri reševanju iz premnogih zagat v programskem okolju ROOT.



---

# KAZALO

---

UVOD	1
<b>i MOTIVACIJA</b>	<b>3</b>
1 EKSPERIMENT BELLE II	5
1.1 Trkalnik SuperKEKB	6
1.2 Spektrometer Belle II	7
2 IDENTIFIKACIJA DELCEV V SPEKTROMETRU BELLE II	9
2.1 Sevanje Čerenkova	9
2.2 Identifikacija delcev s sevanjem Čerenkova	11
2.3 Detektor obročev Čerenkova ARICH	11
2.3.1 Sevalec	15
2.3.2 Fotonski detektor	18
2.4 Hibridni plazovni fotonski detektor (HAPD)	22
2.4.1 Ojačanje	22
2.4.2 Porazdelitev naboja	24
2.4.3 Zaznavanje fotonov Čerenkova	24
2.4.4 Kvantni izkoristek fotokatode	25
2.4.5 Število zaznanih fotonov Čerenkova	26
2.4.6 Delovanje v magnetnem polju	27
2.4.7 Čitalna elektronika	29
2.5 Ločljivost pri meritvi kota Čerenkova	31
<b>ii MERITEV LASTNOSTI SENZORSKIH MODULOV</b>	<b>33</b>
3 OPIS APARATURE	35
3.1 Zgradba aparature	35
3.1.1 Izbira laserja	38
3.1.2 Nastavitev intenzitete svetlobe	40
3.1.3 Napetosti	40
3.2 Umeritev srednjih vrednosti kanalov	42
3.3 Meritev števila sunkov v odvisnosti od praga diskriminacije	45
3.4 Meritev časovne odvisnosti velikosti signala	48
3.5 Pozicijska občutljivost HAPD	52
4 DELOVANJE SENZORJEV PRI OTEŽENIH POGOJIH	59

4.1	Sevalne poškodbe	59
4.2	Optimizacija delovanja	60
5	IZVEDBA MERITEV Z APARATURO	67
	ZAKLJUČEK	74
iii	DODATEK	77
A	POROČILO ZA HAPD ZJ5296	79
	VIRI IN LITERATURA	89



---

## SEZNAM SLIK

---

Slika 1.1	Shematski prikaz pospeševalnika SuperKEKB.	6
Slika 1.2	Shematski prikaz spektrometra Belle II z vrisanimi večjimi detektorskimi komponentami.	7
Slika 2.1	Oblika polarizacije dielektrične snovi pri prehodu nabitega delca	9
Slika 2.2	Shematski prikaz konstruktivne interference elektromagnetnega sevanja.	10
Slika 2.3	Odvisnost kota Čerenkova od gibalne količine (a) in njegova porazdelitev (b) za kaone in pione v sevalcu z lomnim količnikom 1.05 pri gibalni količini 3.5 GeV/c. Z rdečimi črtami so vrisane srednje vrednosti in standardne deviacije porazdelitev.	12
Slika 2.4	Shematski prikaz detektorja obročev Čerenkova brez fokusirnega sistema zrcal, ki bo vgrajen v spektrometer Belle II.	13
Slika 2.5	Shema postavitve fotonских detektorjev (zgoraj) in sevalnih plošč (spodaj) detektorja ARICH.	14
Slika 2.6	Shematski prikaz napake zaradi nepoznavanja točke emisije fotona $\sigma_{\theta}^{emp}$ (a) in končne velikosti fotonsega detektorja $\sigma_{\theta}^{pix}$ (b).	15
Slika 2.7	Shematski prikaz povezave med nedoločenostjo mesta izsevanja posameznih fotonov $\sigma_{\theta}^{emp}$ (na shemi označeno z $\sigma_{\theta}^{(1)}$ in $\sigma_{\theta}^{(2)}$ ) in debelino sevalca.	15
Slika 2.8	Prikaz porazdelitve izsevanih fotonov (modra črta), prepustnosti 4 cm debelega aerogela (vijolična črta) in njunega produkta (oranžna črta).	17
Slika 2.9	Optimizacija debeline sevalca: napaka pri meritvi kota Čerenkova kot funkcija debeline za tri aerogele, ki se razlikujejo v absorpcijski dolžini.	17
Slika 2.10	Detekcija svetlobe v silicijevi fotodiodi.	19
Slika 2.11	Shematski prikaz delovanja plazovnih fotodiod (a) in ojačanje fotodiode v odvisnosti od zaporne napetosti (b). Oznake + in – predstavljajo močnejše in šibkeje dopirano p oziroma n področje.	20

- Slika 2.12 (a) Prikaz delovanja plazovnih fotodiod v Geigerjevem načinu. Razelektritev: izhodni signal, ki ga dobimo ob sprožitvi (Geigerjeva razelektritev); dušenje: zaradi dušilnega upora po sprožitvi zaporna napetost pade na  $V_{BR}$ ; polnjenje: zaporna napetost naraste in APD ponovno deluje v Geigerjevem načinu. (b) Shematski prikaz vezave celic v SiPM. Znotraj celice se nahaja dušilni upor z APD v Geigerjevem načinu.  $V_R$  je zaporna napetost,  $V_{BR}$  pa napetost, pri kateri preidemo v Geigerjev način delovanja. 21
- Slika 2.13 Shematski prikaz delovanja hibridnih APD. 21
- Slika 2.14 Shematski prikaz (a) in fotografija (b) HAPD. 22
- Slika 2.15 Predojačanje (a) in plazovno ojačanje (b) v odvisnosti od priključene napetosti za tipičen HAPD. 23
- Slika 2.16 Spekter naboja, kjer vrhovi ustrezajo različnim številom zaznanih fotonov. 24
- Slika 2.17 Izviri dodatnih prispevkov pri meritvah Čerenkovega kota, ki so posledica HAPD. 25
- Slika 2.18 Kvantni izkoristek fotokatode tipičnega HAPD-ja (a) v primerjavi s kvantnim izkoristkom fotokatod klasičnih fotopomnoževalk (b) v odvisnosti od valovne dolžine. 26
- Slika 2.19 Prikaz porazdelitve prepuščenih fotonov iz aerogela (oranžna črta), geometrijskega izkoristka detektorja (rdeča črta), kvantnega izkoristka fotokatode (zeleno črta) in njihovega produkta (vijolična črta). 27
- Slika 2.20 Porazdelitev zadetkov enodimenzionalne meritve po centrih kanalov ene vrste celic HAPD-ja brez (a) in z (b) magnetnim poljem gostote 1.5 T. 28
- Slika 2.21 Ukrivljenost trajektorij fotoelektronov na robu HAPD zaradi nehomogenega električnega polja. 28
- Slika 2.22 Signal iz celotnega HAPD-ja pri daljšem osvetljevanju ene celice brez (a) in z (b) magnetnim poljem gostote 1.5 T. 29
- Slika 2.23 Shematski prikaz delovanja čipa ASIC. 30
- Slika 3.1 Shema postavitve celotnega poskusa. 36
- Slika 3.2 Prožilni signal na vhodu (zgornja črta) in izhodu (spodnja črta) diskriminatorja. 37
- Slika 3.3 Analogni in digitalni signal na osciloskopu. S pomožnimi belimi črtami je vrisana njuna povezava. 39
- Slika 3.4 Absorpcijska dolžina svetlobe v siliciju 39
- Slika 3.5 Intenzitete posameznih laserskih žarkov (a) pred in (b) po atenuaciji žarkov pri meritvi posameznih fotonov. 41

Slika 3.6	Fotografija fokusirne optike brez (a) in z (b) atenuatorjem.	42
Slika 3.7	Shematski prikaz signala enega kanala neosvetljene merilne naprave (levo) in njegove porazdelitve (desno).	42
Slika 3.8	Z rdečo črto je vrisan trenutni prag diskriminacije, s turkizno črto pa porazdelitev signala.	43
Slika 3.9	Odziv enega kanala merilne naprave v odvisnosti od praga diskriminacije.	43
Slika 3.10	Odziv vseh 144 kanalov HAPD pred (a) in po (b) umeritvi v odvisnosti od praga diskriminacije. Vrisani merilni prag diskriminacije (rdeča črta) predstavlja prag za umeritev elektronike, ki smo ga nato uporabljali pri nadaljnjih meritvah.	44
Slika 3.11	Shematski prikaz povezave med številko in pozicijo kanala iz zadnje strani.	45
Slika 3.12	Meritev odziva posameznega kanala HAPD na svetlobo nizke intenzitete v odvisnosti od praga diskriminacije. Z rdečo črto je vrisan merilni prag diskriminacije, ki smo ga uporabljali pri meritvah pozicijske občutljivosti.	46
Slika 3.13	Meritev odziva HAPD v odvisnosti od praga diskriminacije. Pri meritvi smo s svetlobo nizke intenzitete osvetljevali samo en kanal na HAPD-ju. Z rdečo črto je vrisan merilni prag diskriminacije, ki smo ga uporabljali pri meritvah pozicijske občutljivosti.	47
Slika 3.14	Odziv osvetljenih kanalov HAPD v odvisnosti od praga diskriminacije. Z belo črto je vrisan merilni prag diskriminacije, ki smo ga uporabljali pri meritvah pozicijske občutljivosti.	47
Slika 3.15	Dvodimenzionalni prikaz ojačanja digitalnega signala HAPD-ja ZJ5296. S številkami in črno-belo skalo je prikazana vrednost ojačanja kanala $G_d$ .	48
Slika 3.16	Časovna odvisnost velikosti signala iz HAPD (a) in pripadajoča porazdelitev naboja (b).	49
Slika 3.17	Porazdelitev dogodkov po velikosti signala za vse kanale detektorja HAPD ZJ5296.	50
Slika 3.18	Dvodimenzionalni prikaz ojačanja analognega signala HAPD-ja ZJ5296. S številkami in črno-belo skalo je prikazana vrednost ojačanja kanala $G_a$ .	51
Slika 3.19	Ojačanje vseh 144 kanalov detektorja HAPD ZJ5574, dobljeno iz kontrolnega analognega signala.	52
Slika 3.20	Pozicijska občutljivost HAPD na svetlobo nizke intenzitete v okolici sredine senzorja.	53

- Slika 3.21 Shematska razlaga dolgih repov pri enodimenzionalni meritvi pozicijske občutljivosti HAPD. 53
- Slika 3.22 Pozicijska občutljivost desete vrstice in stolpca HAPD-ja ZJ5296 z (a) in brez (b) priključene visoke napetosti. 55
- Slika 3.23 Slabo delovanje (a), nedelovanje (b) in šumenje (c) kanala. Prvi efekt je viden preko manjšega števila zabeleženih dogodkov na vseh pozicijah tretjega kanala iz leve (modra črta) na HAPD ZJ5574, drugi preko popolne odsotnosti signala iz sedmega kanala (manjkajoča črna črta) na HAPD ZJ5587 in tretji kot konstanten signal neodvisen pri vseh pozicijah (zelena črta) na HAPD ZJ5319. Iz leve polovice vrstice HAPD-ja ZJ5319 ni odziva, ker na čip APD ni bila priklopljena zaporna napetost. 56
- Slika 3.24 Meritev pozicijske občutljivosti HAPD-ja, kjer vsaka vrstica na sliki predstavlja vrstico kanalov na HAPD-ju. Na osi  $y$  je za vsako vrstico logaritemska skala z minimalno vrednostjo 1 in maksimalno  $10^4$ . 57
- Slika 4.1 Časovna odvisnost velikosti signala iz sensorja za štiri različne nastavitve parametra GAIN pri najmanjši nastavitvi parametra SHAPINGTIME. Z belimi črtami sta vrisana začetek in konec signala. 61
- Slika 4.2 Časovna odvisnost velikosti signala iz sensorja za štiri različne nastavitve parametra SHAPINGTIME pri najmanjši nastavitvi parametra GAIN. Z belimi črtami sta vrisana začetek in konec signala. 61
- Slika 4.3 Porazdelitev ojačanja kanalov sensorja v odvisnosti od parametra GAIN pri parametru SHAPINGTIME 0. 62
- Slika 4.4 Srednje vrednosti ojačanja  $G_a$  (zgoraj), njihove razmazanosti  $\sigma_a$  (sredina) in relativne razmazanosti  $\sigma_a/G_a$  (spodaj) v odvisnosti od parametra GAIN za vse 4 parametre SHAPINGTIME. Barvne črte so dodane izključno za lažjo razpoznavnost meriskih točk. 62
- Slika 4.5 Razmerje med signalom in šumom v odvisnosti od parametra GAIN pri vseh parametrih SHAPINGTIME. 63
- Slika 4.6 Porazdelitev ojačanja (zgoraj), števila zadetkov (sredina) in razmerja signal/šum (spodaj) iz digitalnega (a) in kontrolnega analognega (b) signala pri razliki med zaporno in nominalno napetostjo  $-9\text{ V}$  za HAPD ZJ5296. 64

Slika 4.7	Rezultati odvisnosti ojačanja $G$ , razmazanosti $\sigma$ in relativne razmazanosti $\sigma/G$ v odvisnosti od razlike med zaporno in nominalno napetostjo za digitalni (a) in kontrolni analogni (b) signal za HAPD s serijsko številko ZJ5296. 65	
Slika 4.8	Število sunkov v odvisnosti od razlike med zaporno in nominalno napetostjo za digitalni (a) in kontrolni analogni (b) signal za HAPD s serijsko številko ZJ5296. 65	
Slika 4.9	Razmerje med signalom in šumom v odvisnosti od razlike med zaporno in nominalno napetostjo za digitalni (a) in kontrolni analogni (b) signal za HAPD s serijsko številko ZJ5296. 66	
Slika 5.1	Program HAPD_napetosti. Za razlago glej seznam pod točko C. 68	
Slika 5.2	Program SAO2_daq. Za razlago glej seznam pod točkama D in F. 69	
Slika 5.3	Program SAO2_daq okno Calibration. Za razlago glej seznam pod točko E. 69	
Slika 5.4	Program SAO2_daq okno Position Scan. Za razlago glej seznam pod točko K. 70	
Slika 5.5	Program SAO2_daq okno CAEN_v729. Za razlago glej seznam pod točko K. 72	
Slika A.1	Prikaz nihanja priklopljenih napetosti in tokov med standardnimi meritvami. Vidimo, da so napetosti večinoma stabilne. 79	
Slika A.2	Eno in dvo dimenzionalen prikaz ojačanja kontrolnega analognega signala za vseh 144 kanalov. 80	
Slika A.3	Porazdelitev po naboju za vsak kanal posebej. 81	
Slika A.4	Porazdelitev po naboju za izračun časovnih potekov analognih signalov za vse kanale senzorja. 82	
Slika A.5	Število sunkov v odvisnosti od praga diskriminacije za vsak kanal posebej. 83	
Slika A.6	Število sunkov v odvisnosti od praga diskriminacije za vse kanale senzorja. 84	
Slika A.7	Pozicijska občutljivost senzorja po centrih vrstic z priključeno visoko napetostjo. 85	
Slika A.8	Pozicijska občutljivost senzorja po centrih stolpcev z priključeno visoko napetostjo. 86	
Slika A.9	Pozicijska občutljivost senzorja po centrih vrstic brez priključene visoke napetosti. 87	

Slika A.10	Pozicijska občutljivost senzorja po centrih stolpcev brez priključene visoke napetosti.	88
------------	---	----

---

## SEZNAM TABEL

---

Tabela 2.1	Specifikacije HAPD	23
Tabela 2.2	Seznam nastavljivih parametrov čipa ASIC.	32
Tabela 2.3	Seznam nastavljivih parametrov kanalov na čipu ASIC.	32
Tabela 3.1	Izbira primerne valovne dolžine laserja.	38
Tabela 3.2	Ojačanje petih preverjenih HAPD-jev preko meritve števila sunkov v odvisnosti od praga diskriminacije. Številke v oklepajih predstavljajo število kanalov, uporabljenih za izračun ojačanja. * Meritev števila sunkov v odvisnosti od praga diskriminacije brez osvetljevanja kanalov ni bila izvedena, zato smo težišče šuma $x_0$ digitalnih meritev določili iz meritev z osvetljevanjem, kar se kaže v večji $\sigma_d$ .	50

---

## UVOD

---

Standardni model v fiziki osnovnih delcev zelo dobro opiše eksperimentalne rezultate. Obstajajo pa manjša odstopanja, ki so eden glavnih razlogov za študij redkih procesov, kjer bi se ta odstopanja lahko razkrila.

V prvem poglavju magistrskega dela opišem eksperiment Belle II, pri katerem bodo študirali redke procese pri razpadih mezonov B in D in leptonov  $\tau$ . Le-ta je trenutno v pripravi v Cukubi na Japonskem, kjer gradijo nov trkalnik SuperKEKB in spektrometer Belle II. Pomemben del spektrometrov v fiziki visokih energij so zanesljivi sistemi za identifikacijo delcev. Iz ukrivljenosti sledi delcev v magnetnem polju dobimo njihovo gibalno količino, z meritvijo hitrosti ali odložene energije pa lahko posredno določimo njihovo maso oziroma identiteto.

V drugem poglavju je opisana identifikacija delcev v spektrometru Belle II, ki temelji na določanju hitrosti delcev iz merjenja kota, pod katerim se izsevajo fotoni Čerenkova. Najprej predstavim pojav sevanja Čerenkova in detektor obročev Čerenkova, ki bo ta pojav prvenstveno izkoriščal za ločevanje kaonov od pionov. Sledi opis njegovih glavnih komponent s poudarkom na hibridnem plazovnem detektorju fotonov HAPD (*ang.* Hybrid Avalanche Photon Detector), ki bo uporabljen za detekcijo fotonov.

V tretjem poglavju je opisana aparatura za meritev lastnosti senzorskih modulov, ki smo jo pripravili na *Institutu »Jožef Stefan«*. Predstavljena je umeritev čitalne elektronike, meritev števila sunkov v odvisnosti od praga diskriminacije, meritev časovne odvisnosti velikosti signala in meritev pozicijske občutljivosti senzorskih modulov, ter njihovi rezultati.

V četrtem poglavju na kratko predstavim sevalne poškodbe senzorskih modulov in opišem nastavitve čitalne elektronike, s katerimi se delovanje senzorjev optimizira. Predstavljeni so rezultati pri različnih nastavitvah čitalne elektronike in odziv senzorjev v odvisnosti od zaporne napetosti, s katero smo simulirali sevalne poškodbe, ki se bodo pojavile tekom delovanja eksperimenta Belle II.

V zadnjem poglavju je predstavljen protokol meritev lastnosti senzorskih modulov od njihovega priklopa v aparaturo do prikaza poročila v dokumentu pdf, ki je predstavljen v dodatku.





Del I

MOTIVACIJA



---

## EKSPERIMENT BELLE II

---

Standardni model je trenutno najbolj podprta in potrjena teorija na področju fizike osnovnih delcev. V času formulacije je pojasnil mnogo eksperimentalnih rezultatov ter napovedal nove delce in procese, ki so jih kasneje tudi odkrili. Njegovo uspešnost potrjujejo

- A. združitev dveh osnovnih interakcij v poenoteno elektrošibko teorijo,
- B. opis močne jedrske interakcije s kvantno kromodinamiko in
- C. opis vseh osnovnih delcev, ki sestavljajo snov.

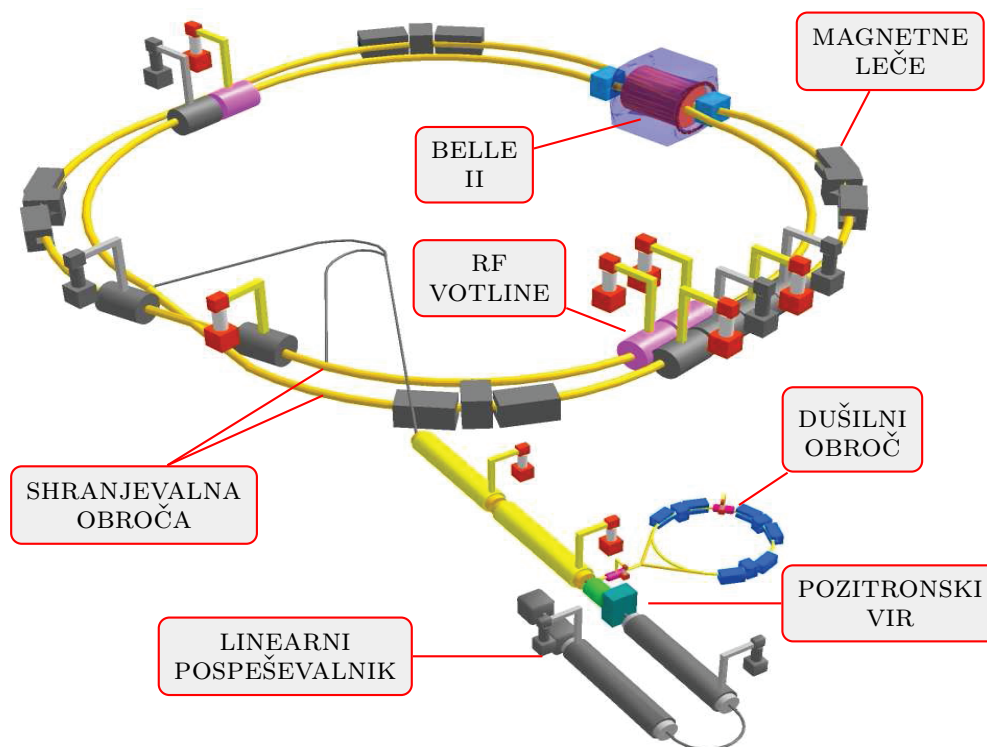
Vendar kljub vsem uspehom, standardni model v trenutni obliki ne vključuje gravitacije, nevtrinom ne pripiše mas in asimetrije med snovjo in antisnovjo ne opiše v zadostni meri. To ne pomeni, da je napačen, temveč da je del obširnejše teorije, ki je še ne znamo potrditi ali postulirati.

Iskanje procesov in mehanizmov pri katerih standardni model ne velja, je trenutno eden glavnih ciljev fizike visokih energij. Načini iskanja odstopanj pa so različni. V kolaboraciji Belle II so se odločili, da jih bodo iskali preko “obzorja natančnosti”. To pomeni, da bodo trkali delce pri energijah nekaj GeV in študirali zelo redke razpade mezonov B in D ter leptonov  $\tau$ , ki jih zaradi premajhnega števila zabeleženih dogodkov še niso opazili. Zato potrebujejo trkalnik osnovnih delcev, ki bo skrbel za visoko pogostost trkov. Zraven tega potrebujejo še zelo natančen in zanesljiv spektrometer za beleženje vseh zanimivih dogodkov. Za tak pristop so se odločili zaradi izjemnega uspeha spektrometra Belle, ki je do junija 2010 s trkalnikom KEKB zbral vzorec podatkov z integrirano luminoznostjo približno  $1 \text{ ab}^{-1}$ . Eden izmed vidnejših rezultatov je bila potrditev kršenja simetrije CP v sistemu mezonov B, ki je v letu 2008 privedla do podelitve Nobelove nagrade *Y. Namubu*, *M. Kobayashi*ju in *T. Masakawai* za odkritje in teoretično razlago kršitve simetrije CP.

V nadaljevanju tega poglavja bom opisal trkalnik SuperKEKB in spektrometer Belle II, ki ju trenutno gradijo na inštitutu KEK v Cukubi na Japonskem. Njun obširnejši opis lahko bralec poišče v [1] in [2].

## 1.1 TRKALNIK SUPERKEKB

Trkalnik SuperKEKB (slika 1.1) bo kakor njegov predhodnik KEKB, asimetrični  $e^-e^+$  trkalnik. Sestavljala ga bosta dva obroča z obsegom približno 3 km, ki se bosta nahajala 11 m pod površjem v tunelu, narejenem za pospeševalnik TRISTAN (predhodnik pospeševalnika KEKB). V enem obroču, imenovanem visoko-energijski obroč HER (*ang.* high energy ring), bodo z energijo 7.0 GeV krožili elektroni, v drugem, nizko-energijskem obroču LER (*ang.* low energy ring), pa pozitroni pri energiji 4.0 GeV. Težišče razpadnih produktov na ta način leti v smeri HER in omogoča študij časovnih odvisnosti razpadov. Oba tipa delcev bodo v obroča vbrizgavali s pomočjo linearnega pospeševalnika, kar bo omogočalo konstantno dopolnjevanje gruč delcev in posledično boljši izkoristek ter večjo pogostost trkov.

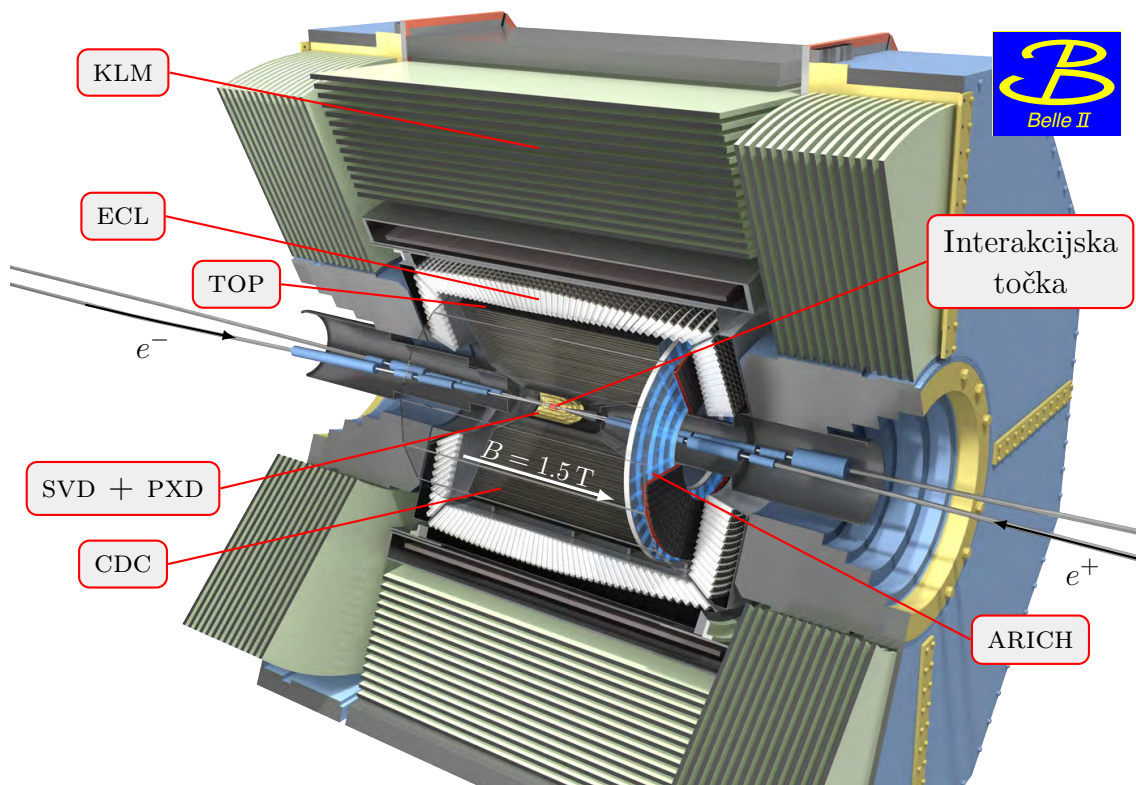


Slika 1.1: Shematski prikaz pospeševalnika SuperKEKB [2].

Nadgradnja bo omogočala približno 40-kratno povečanje pogostosti trkov v primerjavi z KEKB. S tem bo SuperKEKB v svoji življenjski dobi zbral 50-krat večji vzorec podatkov od predhodnika.

## 1.2 SPEKTROMETER BELLE II

Spektrometer Belle II (slika 1.2) bo zgrajen okrog edine interakcijske točke, kjer se bosta elektronski in pozitronski žarek križala.



Slika 1.2: Shematski prikaz spektrometra Belle II z vrisanimi večjimi detektorskimi komponentami.

Ogrodje spektrometra bo sestavljalo močan elektromagnet, ki bo generiral magnetno polje z gostoto 1.5 T, v katerem se bodo tiri nabitih delcev ukrivili. Znotraj magnetnega polja, ki bo kazalo v smeri curka HER, se bodo z izjemo sistema KLM nahajali vsi sistemi, vrisani na sliki 1.2.

Pri trkih  $e^-$  in  $e^+$  nastanejo različni delci, od katerih nekateri le šibko reagirajo s snovjo (nevtrini), večina pa razpade prehitro, da bi jih detektirali neposredno. Pri razpadih lahko detektiramo samo dolgožive produkte, ki prepotujejo zadostno razdaljo v detektorju, da izmerimo njihove lastnosti (gibalno količino, maso in energijo) in nato rekonstruiramo njihove starše. Detekcija delcev se tako poenostavi na zaznavanje elektronov, mionov, pionov, nevtralnih in nabitih kaonov, protonov, nevtronov in fotonov, starše pa rekonstruiramo s kombiniranjem delcev.

Energiji HER in LER nista bili izbrani naključno. Izbrani sta bili tako, da celotna energija v težiščnem sistemu (CMS, *ang.* Center of Mass System) ravno ustreza masi resonance  $Y(4S)$ .

$$E_{\text{CMS}} = 2\sqrt{E_{\text{HER}}E_{\text{LER}}} = 10.58 \text{ GeV} \quad (1.1)$$

Ta resonanca pa večinoma razpade v par (nabitih ali nevtralnih) kratkoživih mezonov B. Pri študiju večine razpadov moramo izmeriti njune razpadne točke in ju rekonstruirati iz razpadnih produktov. Za prvo bomo poskrbeli z detektorjema verteksov PXD in SVD, ki se bosta nahajala okrog interakcijske točke. Sledila jima bo osrednja potovalna komora CDC, ki bo preko ionizacije plina rekonstruirala zaradi magnetnega polja ukrivljene sledi vseh nabitih delcev. To nam bo omogočalo določitev gibalne količine. Zraven tega bomo s CDC merili še specifične energijske izgube nabitih delcev  $dE/dx$ . Pri identifikaciji delcev bodo zraven CDC sodelovali še vsi preostali detektorski sistemi. Sledila bosta detektor časa razširjanja fotonov Čerenkova TOP in detektor obročev Čerenkova ARICH, ki bosta preko sevanja Čerenkova skupaj poskrbela za identifikacijo kaonov in pionov. Zadnja na vrsti sta elektromagnetni kalorimeter ECL in sistem KLM. Prvi bo z meritvijo odložene energije identificiral fotone in elektrone. Drugi pa bo detektiral dolgožive nevtralne kaone  $K_L^0$  in mione, ki se zaradi šibke interakcije s snovjo ne zaustavijo v elektromagnetnem kalorimetru. Detektor KLM bo s svojo laminirano zgradbo deloval še kot povratni jarem magneta, v katerem se bodo zaključevale njegove silnice.

Kot vidimo, ima vsaka detektorska komponenta v spektrometru svojo nalogo. Vendar z vsako posamezno ne moremo ugotoviti, kaj se pri trkih dogaja. Šele ko združimo informacije iz večih detektorskih komponent, lahko rekonstruiramo kinematične lastnosti razpada in identiteto nastalih delcev.

---

IDENTIFIKACIJA DELCEV V SPEKTROMETRU BELLE II

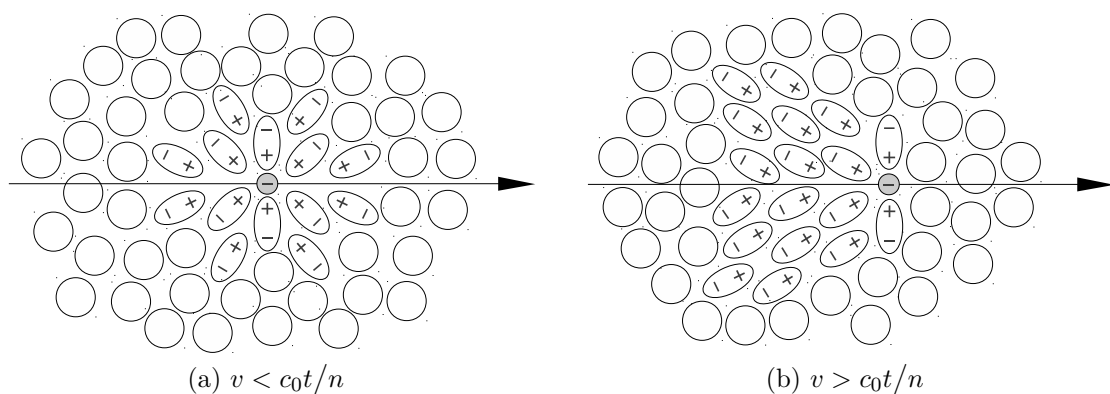
---

Med detektorskimi komponentami prejšnjega poglavja sem omenil detektor obročev Čerenkova, ki bo za identifikacijo kaonov in pionov uporabljal sevanje Čerenkova. V tem poglavju bom opisal izvor in pomembnejše lastnosti tega sevanja, potek ločevanja, in predstavil obliko ter komponente tega detektorja.

### 2.1 SEVANJE ČERENKOVA

Efekt, pri katerem nabiti delci, ki v dielektrični snovi potujejo hitreje kot svetloba, izsevajo fotone, imenujemo sevanje Čerenkova. Za odkritje in interpretacijo tega efekta so *P. A. Čerenkov*, *I. M. Frank* in *I. J. Tamm* leta 1958 prejeli Nobelovo nagrado.

Nabiti delci pri prehodu skozi dielektrično snov povzročijo začasno polarizacijo snovi v bližnji okolici delca. To pomeni, da se težišči pozitivnega in negativnega naboja v okoliških molekulah rahlo razmakneta in dobimo šibke električne dipole. Po prehodu delca pa takšno stanje snovi ni stabilno, zato se dipoli relaksirajo in sevajo fotone.



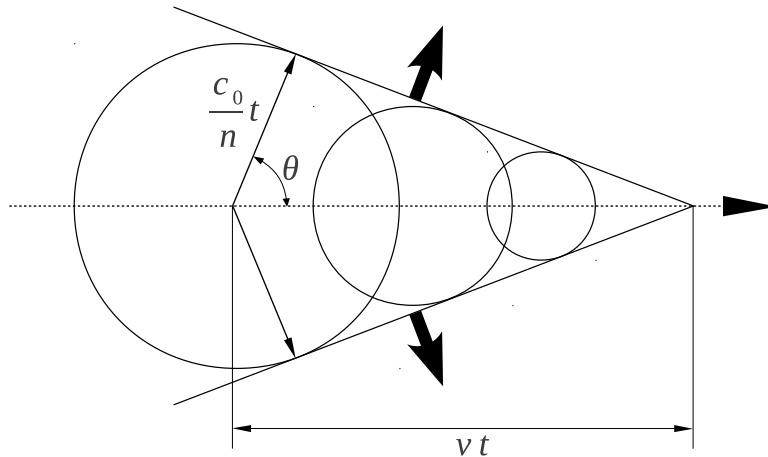
Slika 2.1: Oblika polarizacije dielektrične snovi pri prehodu nabitega delca [3].

V primeru, da je hitrost nabitega delca manjša od hitrosti svetlobe v dielektriku, je polarizacija snovi okrog delca simetrična in pri relaksaciji dobimo destruktivno interferenco fotonov (slika 2.1a). Nasprotno pa je pri hitrostih višjih od hitrosti svetlobe v dielektriku, kjer polarizacija sledi delcu. Tedaj fotoni interferirajo konstruktivno in dobimo elektromagnetno valovno fronto (slika 2.1b). Takšna valovna fronta je analogna Machovemu zvočnemu valovnemu čelu, ki ga povzročijo objekti med gibanjem z nadzvočno hitrostjo.

Pogoj za Čerenkovo sevanje je torej, da se nabiti delec giblje v snovi hitreje od svetlobe

$$v > c_0/n, \quad (2.1)$$

kjer je  $v$  hitrost delca,  $c_0$  hitrost svetlobe v vakuumu in  $n$  lomni količnik snovi. Elektromagnetna valovna fronta, ki se pri izpolnjenem pogoju ustvari, je prikazana na sliki 2.2. V času  $t$  se delec premakne za  $vt = \beta c_0 t$ , kjer je  $\beta = v/c_0$ , elektromagnetno valovanje pa za  $c_0 t/n$ . Iz geometrije sledi, da se elektromagnetna valovna



Slika 2.2: Shematski prikaz konstruktivne interference elektromagnetnega sevanja [3].

fronta oziroma sevanje Čerenkova izseva pod karakterističnim kotom Čerenkova ( $\theta$ )

$$\cos \theta = \frac{1}{\beta n}, \quad (2.2)$$

iz česar dobimo pogoj za prag hitrosti delcev  $\beta$ , nad katerim dobimo Čerenkovo sevanje

$$\beta_{\text{prag}} = \frac{1}{n}. \quad (2.3)$$

*Frank* in *Tamm* [4] sta izpeljala relacijo za sevalne izgube ( $dW$ ) nabitih delcev kot

$$\frac{d^2W}{d\omega dl} = \frac{z^2 e_0^2}{4\pi \epsilon_0 c_0^2} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right) \omega, \quad (2.4)$$



kjer je  $ze_0$  naboj nabitega delca,  $\omega$  pa frekvenca izsevanih fotonov. Z upoštevanjem  $dW = \hbar\omega dN$  in  $\omega = 2\pi c_0/\lambda$  dobimo iz enačbe 2.4

$$\frac{d^2N}{d\lambda dl} = \frac{2\pi\alpha z^2}{\lambda^2} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2(\lambda)}\right) = \frac{2\pi\alpha z^2}{\lambda^2} \sin^2 \theta, \quad (2.5)$$

kjer  $dN$  predstavlja število izsevanih fotonov Čerenkova med valovnima dolžinama  $\lambda$  in  $\lambda + d\lambda$ , ko nabiti delec preleti pot  $dl$ ,  $\alpha = e_0^2/4\pi\epsilon_0 \hbar c_0 \approx 1/137$  pa je konstanta fine strukture. Upoštevati je seveda potrebno, da mora biti izpolnjen pogoj  $\beta n > 1$ .

Ob integraciji enačbe 2.5 dobimo

$$\frac{dN}{d\lambda} \propto \frac{1}{\lambda^2}, \quad (2.6)$$

ki predstavljata porazdelitev števila izsevanih fotonov v odvisnosti od valovne dolžine. Število fotonov Čerenkova je torej obratno sorazmerno s kvadratom njihove valovne dolžine. Več o sevanju Čerenkova si lahko bralec prebere v [4].

## 2.2 IDENTIFIKACIJA DELCEV S SEVANJEM ČERENKOVA

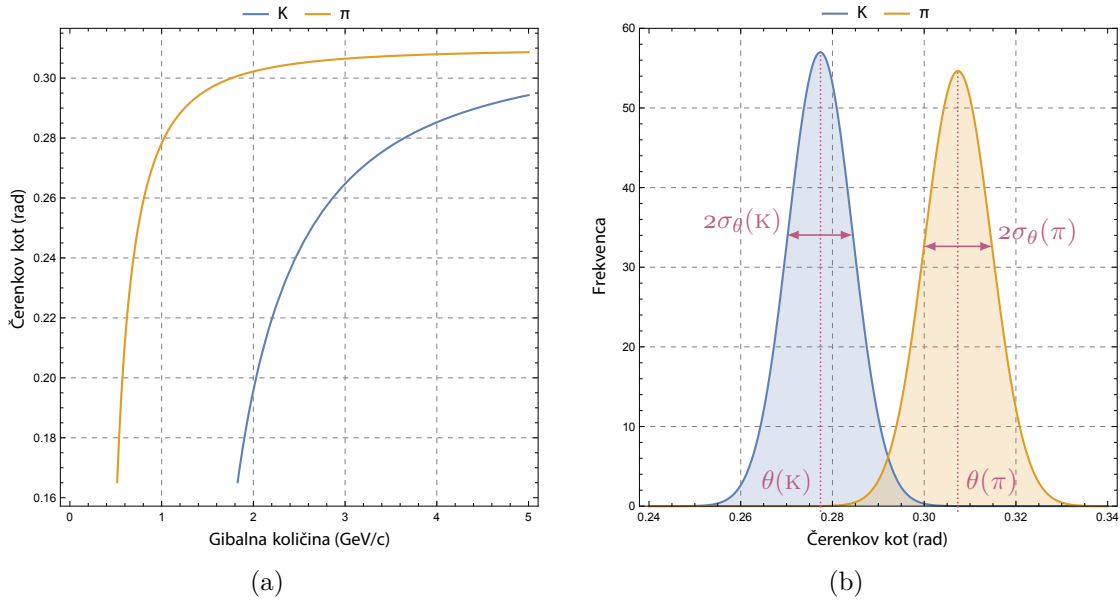
Identifikacija delcev s sevanjem Čerenkova pomeni določitev mase delcev. Maso določimo iz povezave med relativistično gibalno količino  $p$  in hitrostjo  $v$

$$p = \gamma m v. \quad (2.7)$$

Gibalno količino izračunamo iz ukrivljenosti sledi nabitih delcev v magnetnem polju, hitrost pa iz izmerjenega kota Čerenkova (enačba 2.2). Odvisnost je prikazana na sliki 2.3a. Zaradi napak pri meritvi kota Čerenkova je v homogenem sevalcu brez absorpcije porazdelitev izmerjenih vrednosti normalna (slika 2.3b). Npr., za pione in kaone v sevalcu z lomnim količnikom 1.05 pri gibalni količini 3.5 GeV/c sta pričakovani vrednosti kota Čerenkova 307 mrad in 277 mrad. Delce, katerim izmerimo kot enak pričakovanemu za kaone, proglasimo za kaone, pri tem pa zaradi prekrivanja porazdelitev lahko napravimo tudi napako in za kaone proglasimo del pionov. Enako velja tudi za pione. Prekrivanje porazdelitev nam omeji področje gibalnih količin, pri katerih zanesljivo ločujemo delce. Delce lahko zanesljivo ločujemo do gibalnih količin, pri katerih sta porazdelitvi razmaknjeni za vsaj nekaj večkratnikov ločljivosti, s katero izvajamo meritve. Pri razmiku za štirikratnik ločljivosti meritve je izkoristek za identifikacijo kaonov nad 95 % ob napačni identifikaciji pionov pod 2 %.

## 2.3 DETEKTOR OBROČEV ČERENKOVA ARICH

Pri izboru detektorja za identifikacijo delcev spektrometra Belle II so glavno vlogo igrale fizične in fizikalne zahteve. Detektor mora nemoteno delovati znotraj magnetnega polja z gostoto 1.5 T, mora biti odporen na nevtronsko in  $\gamma$  sevanje, ter se



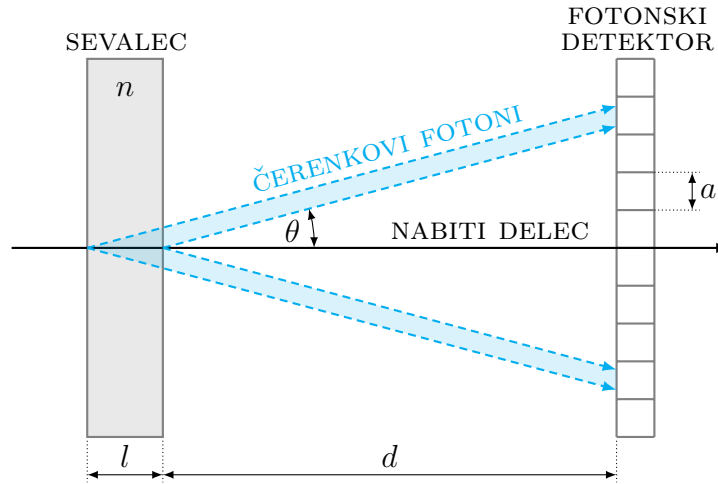
Slika 2.3: Odvisnost kota Čerenkova od gibalne količine (a) in njegova porazdelitev (b) za kaone in pione v sevalcu z lomnim količnikom 1.05 pri gibalni količini 3.5 GeV/c. Z rdečimi črtami so vrisane srednje vrednosti in standardne deviacije porazdelitev.

prilegati v 28 cm široko odprtino med CDC in ECL. Pri teh pogojih mora s  $4\sigma$  ločevati med kaoni in pioni pri gibalnih količinah od 1 GeV/c do 4 GeV/c in diskriminirati med pioni, mioni in elektroni pri gibalnih količinah do 1 GeV/c.

Vsem zahtevam ustreza detektor obročev Čerenkova brez fokusirnega sistema zrcal (*ang.* proximity-focusing Ring Imaging Cherenkov counter) z aerogelom kot sevalcem, ki je shematsko predstavljen na sliki 2.4. Osnovni elementi takšnega detektorja so

- A. prosojen sevalec iz aerogela, kjer nabiti delci izsevajo fotone Čerenkova,
- B. prostor za razširjanje obročev,
- C. pozicijsko občutljivi fotonski detektor s sposobnostjo zaznavanja posameznih fotonov in
- Č. čitalna elektronika.

Z njim bo poskrbljeno za identifikacijo delcev v sprednjem končnem delu spektrometra. Na sliki 2.5 je prikazana razporeditev fotonjskih detektorjev (zgoraj) in sevalcev (spodaj). Vidimo, da bodo fotonjski senzori zloženi v sedem koncentričnih krogov, s čimer bodo pokrivali približno 75 % celotne detektorske ravnine. Sevalna površina



Slika 2.4: Shematski prikaz detektorja obročev Čerenkova brez fokusirnega sistema zrcal, ki bo vgrajen v spektrometer Belle II.

bo sestavljena iz več majhnih ploščic sevalca, saj bi bila izdelava tega iz enega kosa nemogoča.

Na učinkovitost identifikacije vpliva ločljivost meritve kota Čerenkova  $\sigma_{sledi}$ , ki je ključni parameter učinkovitosti našega detektorja. Izračunamo jo kot

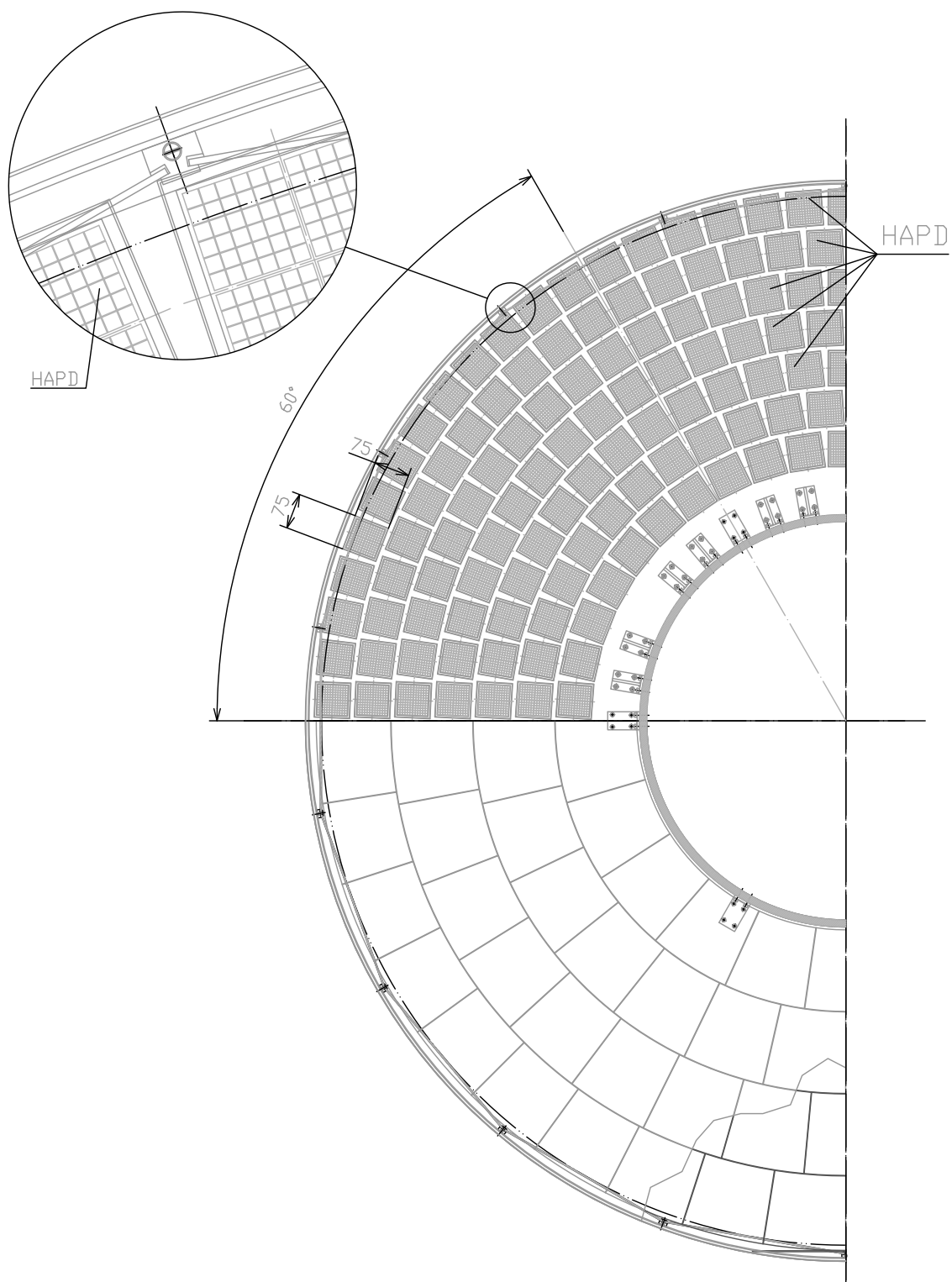
$$\sigma_{sledi} = \sigma_{\theta} / \sqrt{N_{det}}, \quad (2.8)$$

kjer je  $\sigma_{\theta}$  širina porazdelitve detektiranih posameznih fotonov Čerenkova,  $N_{det}$  pa njihovo število. Iz slike 2.4 sta razvidna dva največja izvora napak pri meritvi kota Čerenkova, ki vplivata na  $\sigma_{\theta}$ : nepoznavanje točke emisije fotona  $\sigma_{\theta}^{emp}$  in končna velikost fotonskih detektorjev  $\sigma_{\theta}^{pix}$ . Izračunamo ju kot

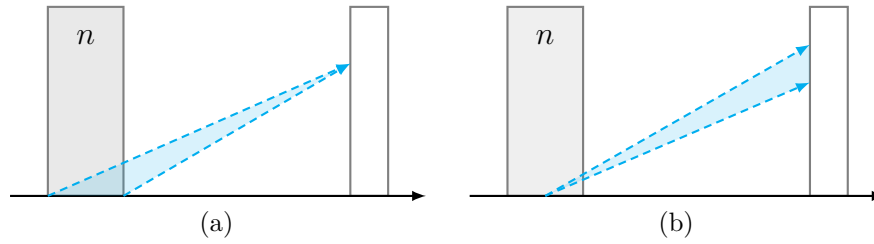
$$\sigma_{\theta}^{emp} = \frac{l}{d\sqrt{12}} \sin \theta \cos \theta \quad \text{in} \quad (2.9)$$

$$\sigma_{\theta}^{pix} = \frac{a}{d\sqrt{12}} \cos^2 \theta, \quad (2.10)$$

kjer  $l$ ,  $a$  in  $d$  zaporedoma predstavljajo debelino sevalca, velikost fotonskega detektorja in razdaljo od sevalca do fotonskega detektorja. Shematska razlaga izvora napak je prikazana na sliki 2.6. Smiselno je, da dimenzije  $l$  in  $a$  izberemo tako, da sta si oba prispevka približno enaka po velikosti. Nesmiselno bi bilo namreč zelo natančno meriti pozicije fotonov, saj je meritev kota obremenjena z napako zaradi nepoznavanja točke izsevanja.



Slika 2.5: Shema postavitve fotonjskih detektorjev (zgoraj) in sevalnih plošč (spodaj) detektorja ARICH.



Slika 2.6: Shematski prikaz napake zaradi nepoznavanja točke emisije fotona  $\sigma_{\theta}^{emp}$  (a) in končne velikosti fotonskega detektorja  $\sigma_{\theta}^{pix}$  (b).

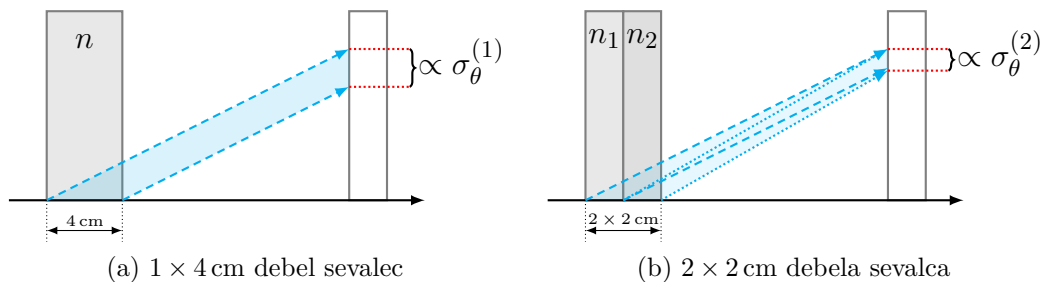
### 2.3.1 Sevalec

Lastnosti sevalca vplivajo na število detektiranih fotonov. V primeru optično popolnoma prepustnega sevalca bi iz njega med 250 nm in 700 nm prišlo (enačba 2.5)

$$\frac{dN}{dl} \approx 1200 \sin^2 \theta \frac{\text{fotonov}}{\text{cm}}. \quad (2.11)$$

To območje sem izbral, ker sovпада s področjem občutljivosti senzorskih modulov, ki bodo uporabljeni v detektorju obročev Čerenkova. Za pion z gibalno količino 3.5 GeV/c v sevalcu z lomnim količnikom 1.05 znaša Čerenkov kot približno 307 mrad, kar zneso 110 izsevanih fotonov na centimeter sevalca.

Da bi povečali število izsevanih fotonov brez izgube ločljivosti, bosta v detektorju uporabljena dva 2 cm debela, zaporedno postavljena sevalca v fokusirni postavitvi. To pomeni, da sta lomna količnika izbrana tako, da se fotoni iz obeh sevalcev pri izbrani gibalni količini zbirajo na istem obroču ( $n_1 < n_2$ ). S tem dobimo približno enako število fotonov, kot če bi uporabili eno debelejšo plast sevalca, s pomembno razliko:  $\sigma_{\theta}$  takšne konfiguracije je manjši, saj se fotoni projicirajo na bolj omejeno področje (slika 2.7).



Slika 2.7: Shematski prikaz povezave med nedoločenostjo mesta izsevanja posameznih fotonov  $\sigma_{\theta}^{emp}$  (na shemi označeno z  $\sigma_{\theta}^{(1)}$  in  $\sigma_{\theta}^{(2)}$ ) in debelino sevalca.

Zaradi pogoja za ločevanje pionov od kaonov

$$\theta(\text{kaon}) - \theta(\text{pion}) \geq 4\sigma_{\text{sledi}} \quad (2.12)$$

pri gibalnih količinah do 4 GeV/c potrebujemo snov z lomnim količnikom v okolici 1.05. Fokusirna postavitev plošč nam ta pogoj začini še z razliko v lomnih količnikih zaporednih sevalcev, ki znaša približno 0.01. Takim zahtevam ustreza silicijev aerogel, ki je sestavljen iz v tridimenzionalno strukturo povezanih zrn amorfnega SiO<sub>2</sub>, znotraj katerih je ujet zrak. Več o aerogelu si lahko bralec prebere v [5]. Za nas pomembna lastnost aerogela je, da mu lahko v procesu proizvodnje z izbiro začetne koncentracije komponent nastavimo lomni količnik med 1.01 in 1.2 [1]. V našem detektorju bosta uporabljeni dve 2 cm debeli plasti aerogela z lomnima količnikoma  $n_1 = 1.045$  in  $n_2 = 1.055$  [1].

### 2.3.1.1 Rayleighjevo sipanje in absorpcija

Velik del aerogela je zrak, ki se nahaja v porah. Te pore so lahko velike do približno 100 nm, kar je že primerljivo z valovnimi dolžinami izsevane Čerenkove svetlobe. To pomeni, da se svetloba na njih Rayleighjevo siplje in je posledično ne moremo uporabiti pri rekonstrukciji obročev Čerenkova. Struktura aerogela torej zelo vpliva na optično prepustnost, ki mora biti čim boljša, da izgubimo tem manj Čerenkovih fotonov. Izmerjeno prepustnost svetlobe (modre točke na sliki 2.8) skozi aerogel debeline  $l$  opišemo z

$$T(\lambda, l) = e^{-\frac{l}{\Lambda(\lambda)}}, \quad (2.13)$$

kjer je  $\Lambda(\lambda)$  atenuacijska dolžina svetlobe v aerogelu, sestavljena iz absorpcijskega in sipalnega prispevka. To prepišemo v Huntovo parametrizacijo

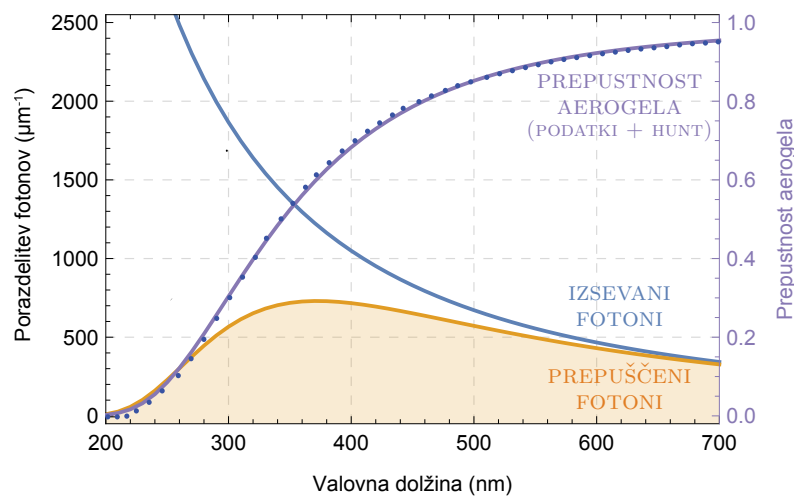
$$T(\lambda, l) = A e^{-\frac{lC}{\lambda^4}}, \quad (2.14)$$

kjer  $A$  predstavlja absorpcijski in  $C/\lambda^4$  sipalni prispevek atenuacijske dolžine. Za prvi prispevek se predpostavi neodvisnost od valovne dolžine, drugi pa predstavlja velikost Rayleighjevega sipanja [6]. S prilagajanjem Huntove parametrizacije (vijolična črta) na izmerjeno prepustnost aerogela po produkciji dobimo pri 400 nm absorpcijsko dolžino 55.2 mm. Za uporabo v našem detektorju je dobro, da je absorpcijska dolžina aerogela v okolici valovne dolžine 400 nm čim daljša, saj tako dobimo več fotonov (enačba 2.13).

Porazdelitev fotonov, ki pridejo nemoteno iz aerogela z debelino  $l$ , po valovni dolžini je

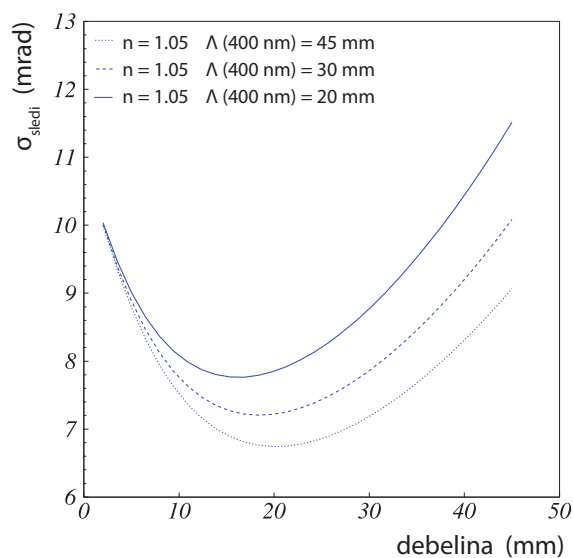
$$\frac{dN}{d\lambda} = \frac{2\pi\alpha z^2}{\lambda^2} \sin^2 \theta T(\lambda, l) dl. \quad (2.15)$$

Z oranžno črto na sliki 2.8 je vrisan produkt porazdelitve izsevanih fotonov in prepustnosti v odvisnosti od valovne dolžine.



Slika 2.8: Prikaz porazdelitve izsevanih fotonov (modra črta), prepustnosti 4 cm debelega aerogela (vijolična črta) in njunega produkta (oranžna črta). Podatki iz [1].

Na sliki 2.9 je prikazana povezava med debelino aerogela in ločljivostjo meritev  $\sigma_{sledi}$ . S spreminjanjem debeline aerogela smo spreminjali število izsevanih in posledično tudi detektiranih fotonov ter napako zaradi nepoznavanja točke izsevanja fotonov. Vidimo, da debelina sevalca 2 cm ni bila izbrana naključno, temveč je pri tej debelini napaka meritev kota Čerenkova minimalna.



Slika 2.9: Optimizacija debeline sevalca: napaka pri meritvi kota Čerenkova kot funkcija debeline za tri aerogele, ki se razlikujejo v absorpcijski dolžini [2].

### 2.3.2 Fotonski detektor

Ugotovili smo, da dobimo na vsako sled iz aerogela zgolj nekaj deset fotonov, ki se ne sipajo in jih lahko uporabimo pri rekonstrukciji obročev Čerenkova. Potrebujemo pozicijsko občutljiv detektor z visokim izkoristkom za zaznavanje posameznih fotonov, ki je sposoben delovati v magnetnem polju z gostoto 1.5 T in pod visoko sevalno obremenitvijo. Delovanje znotraj močnega magnetnega polja onemogoči uporabo klasičnih fotopomnoževalk, saj imajo te težave že v magnetnih poljih z gostoto velikosti mT [7], ker elektroni zaidejo iz pomnoževalne verige.

V osnovi so bili za fotonski detektor na voljo trije kandidati, ki so ustrezali naštem pogojem: hibridni plazovni fotonski detektor HAPD (*ang.* Hybrid Avalanche Photo Detector), fotopomnoževalke z mikrokanalnimi ploščami in silicijeve fotopomnoževalke. Vsi trije so bili obširneje testirani in izkazalo se je, da so silicijeve fotopomnoževalke, ki s svojim izjemno visokim izkoristkom za detekcijo svetlobe zaznajo približno 2 krat več fotonov Čerenkova kot ostala dva kandidata, nagnjene k sevalnim poškodbam zaradi visokega nevtronskega ozadja in ne bi mogle delovati brez težav skozi celotno obdobje delovanja eksperimenta [8]. Med preostalima kandidatoma, pa je bil izbran detektor HAPD, saj pri istih pogojih zazna več Čerenkovih fotonov.

#### 2.3.2.1 Razvoj polprevodniških detektorjev svetlobe

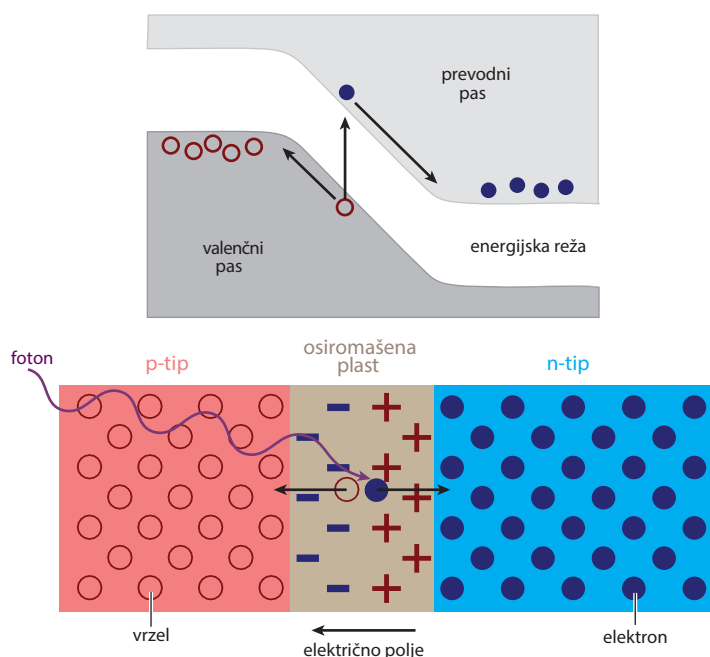
Najpreprostejši polprevodniški detektorji svetlobe so fotodiode. Sestavljene so iz p–n stika (slika 2.10), na katerem se zaradi difuzije nosilcev naboja ustvari osiromašena plast in znotraj nje električno polje. Osiromašeni plasti skupaj s tankim področjem na njenem robu, od koder lahko nosilci naboja difundirajo v območje z električnim poljem, pravimo aktivno področje detektorja.

V primeru, ko v aktivnem področju detektorja nastane par elektron–vrzel, se elektroni zaradi električnega polja začno gibati k n–dopirani plasti, vrzeli pa k p–dopirani plasti. To gibanje nosilcev naboja je torej tok, ki teče skozi fotodiodo in ga lahko zaznamo.

Pare v aktivnem področju generiramo tako, da ga osvetljujemo s fotoni pri energiji višji od energijske razlike valenčnega in prevodnega pasu. V siliciju ta reža znaša približno 1.12 eV, kar ustreza valovnim dolžinam, manjšim od približno 1100 nm. Da se to lahko zgodi, mora foton najprej prodreti v fotodiodo skozi njeno površje in se nato še absorbirati v aktivnem področju. Le to pa mora za učinkovito detekcijo biti večje od absorpcijske dolžine svetlobe (slika 3.4).

Ker fotodiode nimajo notranjega ojačanja, je njihov signal sorazmeren številu zaznanih fotonov. Uporabne so torej v primerih, kjer merimo tok in je hkrati zaznanih veliko fotonov (>1000).



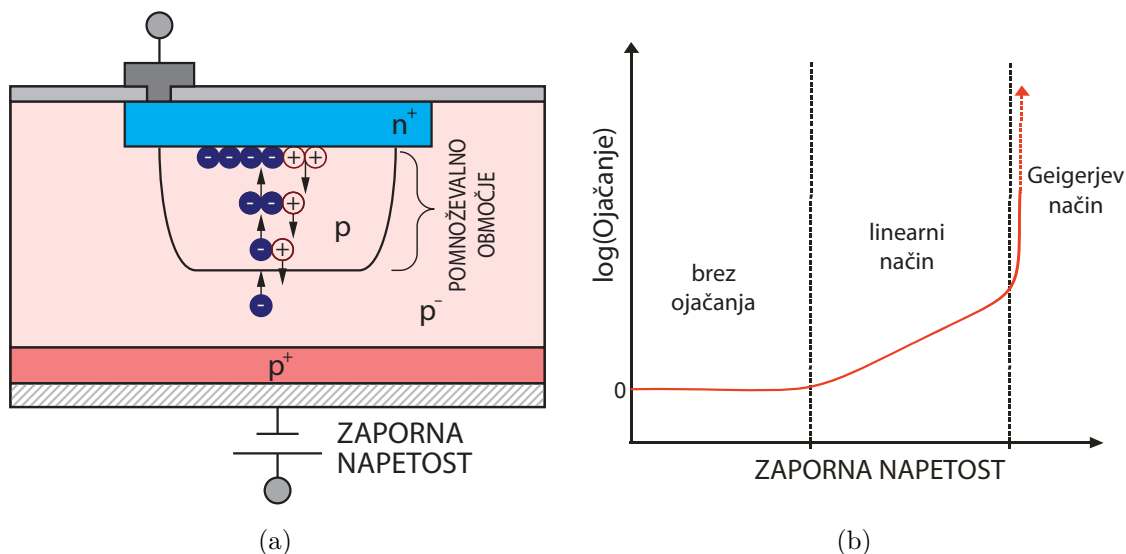


Slika 2.10: Detekcija svetlobe v silicijevi fotodiodi. Prirejeno po [9].

Da bi izboljšali oziroma povečali občutljivost fotodiode, nanjo priključimo visoko zaporno napetost. Znotraj aktivnega področja nastane dovolj veliko električno polje, da lahko prosti nosilci naboja pridobijo dovolj energije za nadaljnjo generacijo parov preko ionizacije. Ker elektroni začnejo ionizirati pri nižjih energijah kot vrzeli, pri njih pride do pojava plazme. Fotodiodam v takšnem načinu delovanja pravimo plazovne fotodiode (APD). Grafičen prikaz delovanja plazovne fotodiode je prikazan na sliki 2.11a.

Faktor ojačanja plazovnih fotodiod je močno povezan z zaporno napetostjo (slika 2.11b). Višja zaporna napetost pomeni večji faktor ojačanja. To velja vse do napetosti, pri kateri postane verjetnost za ionizacijo novih parov s strani vrzeli znatna. Ko jo presežemo, začne ob sprožitvi plazmo skozi fotodiodo teči konstanten tok, kar nam onemogoča nadaljnje meritve. To se zgodi v okolici faktorja ojačanja 1000, kar še vedno ne omogoča zaznavanja posameznih fotonov.

Na tem mestu lahko izberemo dve različni poti, ki pripeljeta do dovolj močnega ojačanja, da lahko detektiramo posamezne fotone. Ena pot je, da še dodatno povečamo zaporno napetost, s čimer preidemo v Geigerjev način delovanja (slika 2.11b). V primeru sprožitve fotodiode začne skozi njo teči tok, ki ga je potrebno zadušiti. To naredimo tako, da v zgradbo APD dodamo dušilni upor (*ang.* quenching resistor), ki po sprožitvi za nekaj trenutkov zniža zaporno napetost, s tem pa ustavi pomnoževanje in zaduši signal (slika 2.12a), dioda pa je nekaj časa neobčutljiva za svetlobo. V primeru, da na skupni izhod vzporedno povežemo več enakih plazovnih

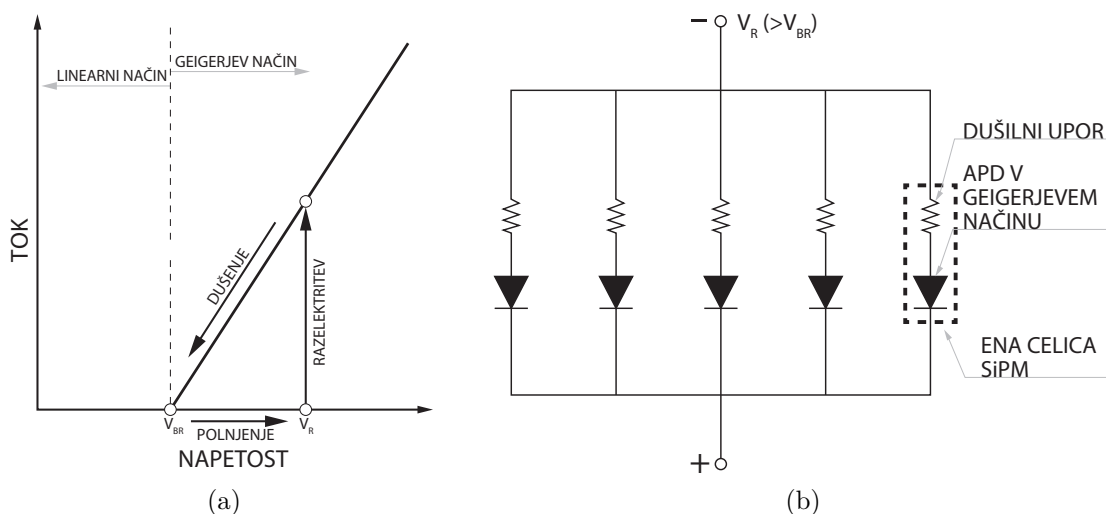


Slika 2.11: Shematski prikaz delovanja plazovnih fotodiod (a) in ojačanje fotodiode v odvisnosti od zaporne napetosti (b). Oznake + in – predstavljajo močnejše in šibkeje dopirano p oziroma n področje.

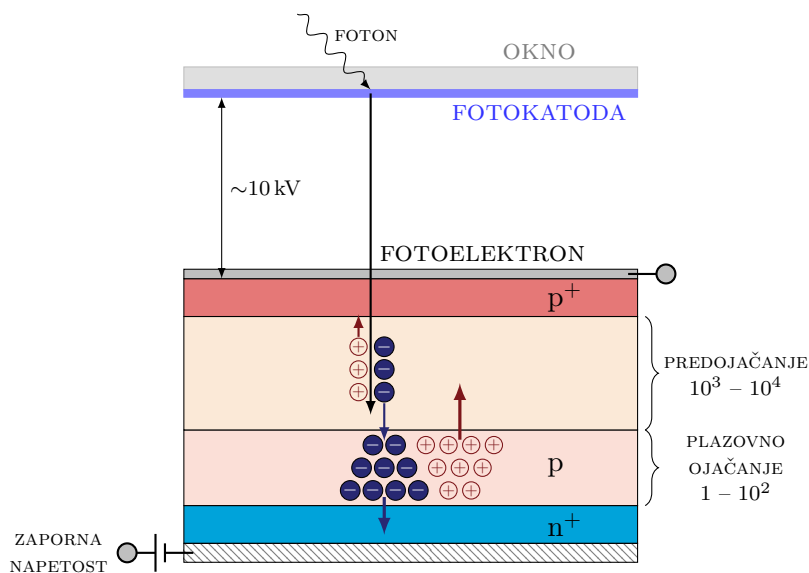
fotodiod (slika 2.12b), ki delujejo v Geigerjevem načinu, dobimo pozicijsko občutljive detektorje svetlobe, imenovane silicijeve fotopomnoževalke (SiPM). Plazovna fotodiode skupaj s svojim dušilnim uporom predstavlja eno celico v SiPM. Dimenzije celic znašajo od  $10\ \mu\text{m}$  do  $100\ \mu\text{m}$ , celotna površina SiPM pa lahko pokriva do nekaj  $\text{mm}^2$ . Celice so med seboj ločene s polisilicijevim upornikom, ki služi še za električno razklapljanje posameznih celic.

Druga pot za učinkovito zaznavo posameznih fotonov je združitev vakuumске tehnologije klasičnih fotopomnoževalk s polprevodniškimi detektorji. Z zamenjavo dinodne pomnoževalne strukture in anode v klasičnih fotopomnoževalkah, z visokim električnim poljem in plazovno fotodiodo, dobimo hibridne plazovne detektorje fotonov. Oblika in shematski prikaz delovanja takšnega detektorja je prikazana na sliki 2.13. S takšno kombinacijo združimo dobro energijsko in prostorsko resolucijo silicijevih detektorjev, z občutljivostjo in velikostjo klasičnih fotopomnoževalk.

Vpadni foton v fotokatodi preko fotoefekta izbije fotoelektron, ki ga močno električno polje pospeši do energije okrog  $10\ \text{keV}$ . Ob trku z APD ima tako dovolj energije za ionizacijo več tisoč primarnih parov elektron–vrzel. Povprečno število tako generiranih parov definira faktor predojačanja. Ti primarni pari se še dodatno ojačijo v APD, kjer vsak ustvari nekaj deset novih sekundarnih parov. Končno ojačanje hibridnih APD je torej zmnožek predojačanja in plazovnega ojačanja, ki lahko znaša do približno  $10^5$ . Takšen tip detektorjev ne more delovati v vseh geometrijah magnet-



Slika 2.12: (a) Prikaz delovanja plazovnih fotodiod v Gigerjevem načinu. Razelektritev: izhodni signal, ki ga dobimo ob sprožitvi (Geigerjeva razelektritev); dušenje: zaradi dušilnega upora po sprožitvi zaporna napetost pade na  $V_{BR}$ ; polnjenje: zaporna napetost naraste in APD ponovno deluje v Geigerjevem načinu. Prirejeno po [10]. (b) Shematski prikaz vezave celic v SiPM. Znotraj celice se nahaja dušilni upor z APD v Geigerjevem načinu.  $V_R$  je zaporna napetost,  $V_{BR}$  pa napetost, pri kateri preidemo v Geigerjev način delovanja. Prirejeno po [10].



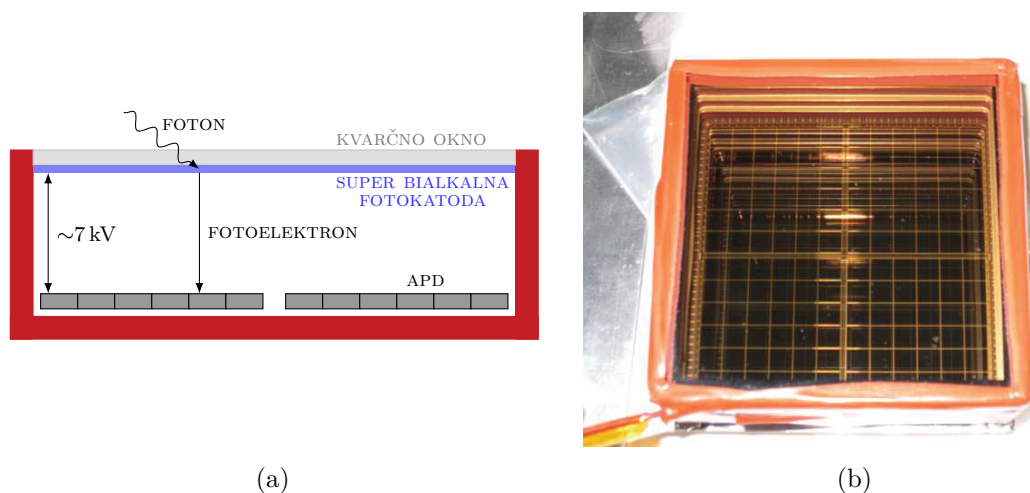
Slika 2.13: Shematski prikaz delovanja hibridnih APD.

nega polja, saj so fotoelektroni v vakuumskem delu še vedno močno občutljivi na magnetno silo. Vendar kot bomo videli v nadaljevanju, lahko delujejo v primerih, kjer magnetno polje kaže pravokotno na vstopno okno.

Več o pregledu in razvoju detektorjev svetlobe si lahko bralec prebere v [9].

#### 2.4 HIBRIDNI PLAZOVNI FOTONSKI DETEKTOR (HAPD)

Za fotonski detektor v Belle II ARICH detektorju je bil izbran HAPD, ki ga je razvil japonski proizvajalec *Hamamatsu Photonics*. Na sliki 2.14 sta prikazana shema in fotografija sensorja HAPD. Polprevodniški senzor je sestavljen iz štirih čipov APD, ki so še nadalje razdeljeni na  $6 \times 6$  celic, saj to omogoča natančnejšo pozicijsko občutljivost. Razlog za takšno delitev polprevodniškega detektorja je težavna in draga proizvodnja velikih APD čipov.



Slika 2.14: Shematski prikaz (a) in fotografija (b) HAPD.

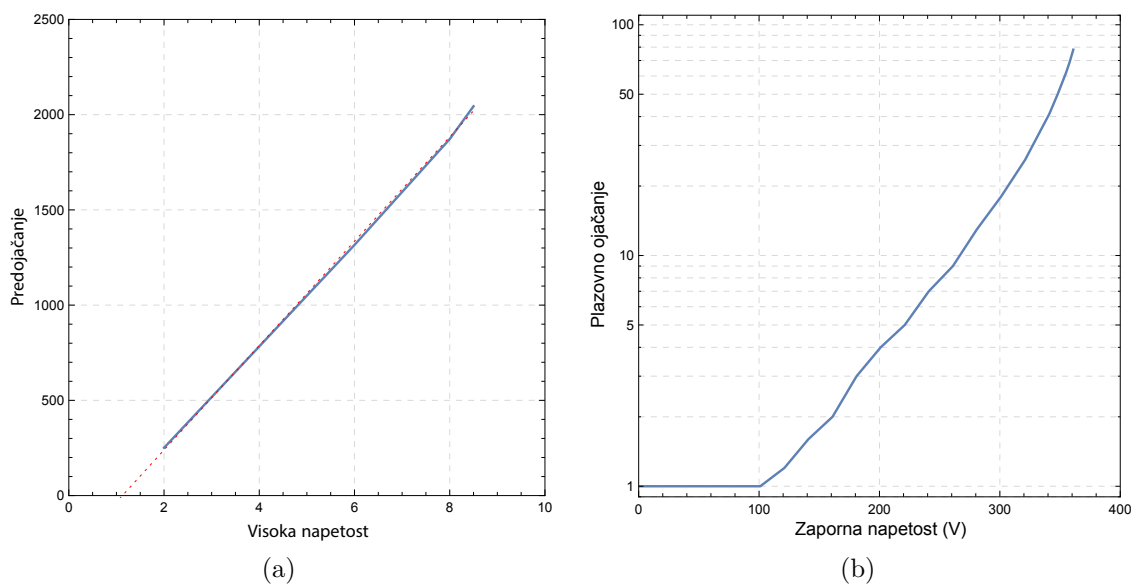
Pomembnejše lastnosti HAPD so zbrane v tabeli 2.1.

##### 2.4.1 Ojačanje

Na sliki 2.15a je prikazana odvisnost predojačanja od visoke napetosti, ki jo priključimo med fotokatodo in polprevodniški detektor. Odvisnost je linearna, saj fotoelektron z energijo  $E$  v siliciju v povprečju ionizira  $E/W$  primarnih parov elektron–vrzel, kjer je  $W$  ionizacijska energija potrebna za generacijo enega para. Ker fotoelektroni pri vstopu v silicij porabijo del pridobljene energije, se ojačanje začne šele pri napetosti približno 1 keV (črtna rdeča črta). Naslednja stopnja ojačanja se začne, ko elektroni iz primarnih parov pridejo do področja, kjer je električno polje dovolj

velikost	72 mm × 72 mm
teža	220 g
število celic	144
velikost celice	4.9 mm × 4.9 mm
tipični kvantni izkoristek	~0.30
delež aktivne površine – $\epsilon_a$	~0.67
učinkovitost zaznavanja fotoelektronov – $\epsilon_e$	~0.80
predojačanje	~1500
plazovno ojačanje	~30
skupno ojačanje	~ $4.5 \times 10^4$
kapaciteta celice	80 pF

Tabela 2.1: Specifikacije HAPD [1].



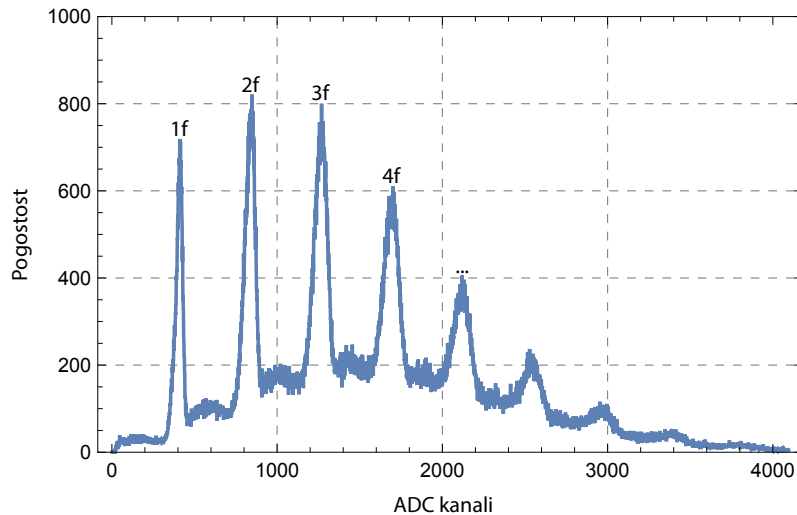
Slika 2.15: Predojačanje (a) in plazovno ojačanje (b) v odvisnosti od priključene napetosti za tipičen HAPD.

močno, da na svoji povprečni prosti poti pridobijo vsaj  $W$  energije, s katero nato ionizirajo sekundarne pare. Število sekundarnih parov z vsakim korakom narašča eksponentno, kar je razvidno tudi iz slike 2.15b. Plazovno ojačanje ima torej eksponentno odvisnost od zaporne napetosti na APD čipu.

Skupno ojačanje detektorja je okrog  $10^5$ , kar je še vedno manj od klasičnih fotopomnoževalk, ki omogočajo ojačanja do  $10^7$ . Vendar lahko z uporabo nizko-šumne elektronike s takim senzorjem zaznavamo posamezne fotone.

#### 2.4.2 Porazdelitev naboja

Na sliki 2.16 je prikazan odziv HAPD na šibke in kratke svetlobne pulze z valovno dolžino 470 nm. Razvidna je izvrstna sposobnost štetja posameznih fotonov, saj so vrhovi dobro ločeni in izstopajoči. Ozadje v porazdelitvi je posledica fotoelektronov, ki se povratno sipljejo na APD (slika 2.20a).



Slika 2.16: Spekter naboja, kjer vrhovi ustrezajo različnim številom zaznanih fotonov.

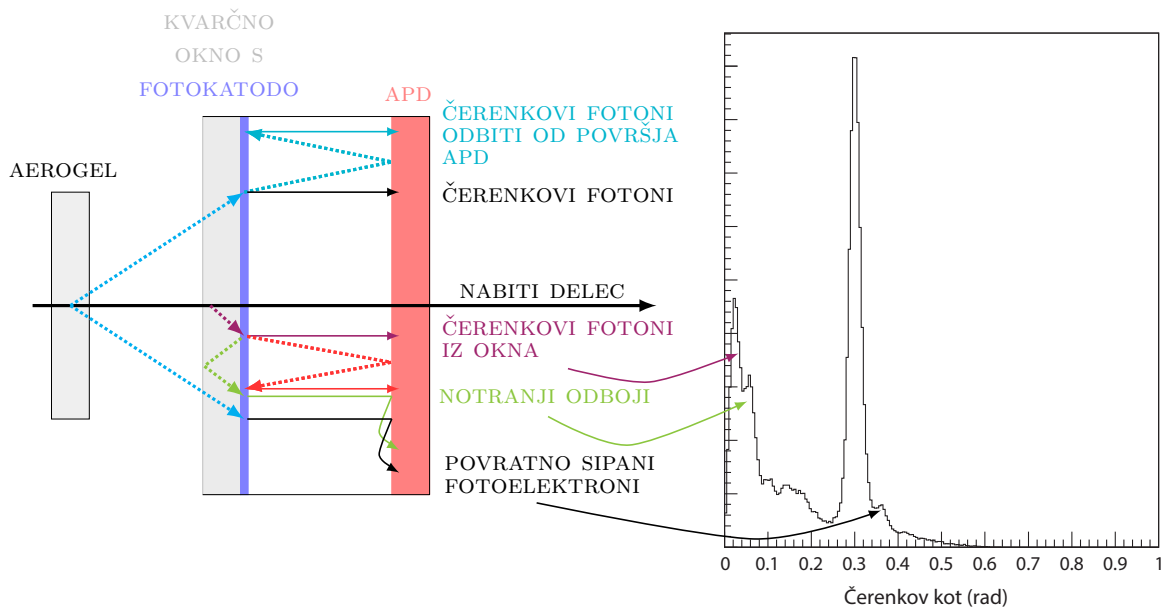
#### 2.4.3 Zaznavanje fotonov Čerenkova

Iz pozicij zazanih fotonov Čerenkova lahko ob poznavanju smeri in pozicije nabitega delca rekonstruiramo tipični kot Čerenkova. Izmerjena porazdelitev fotonov po rekonstruiranem kotu Čerenkova za fotone iz aerogela z lomnim količnikom 1.05 je prikazana na desni strani slike 2.17. Poleg pričakovanega Gaussovega vrha opazimo še dodatne prispevke zaradi:

- A. Rayleighjevo sipanih fotonov Čerenkova v aerogelu (opisano v poglavju 2.3.1.1),

- B. ozadje zaradi efektov v samem sensorju: fotoni Čerenkova, ki se izsevajo v oknu in njihovih notranjih odbojev v njem, ter povratno sipanih fotoelektronov (leva stran slike 2.17) in
- C. fotonov Čerenkova od ostalih nabitih delcev in elektronski šum.

Ob predpostavki, da se fotoni Čerenkova enakomerno sipljejo v vse smeri, se v območje  $\pm 3\sigma_\theta$  izmerjenega kota Čerenkova siplje približno 1.4% le teh. V našem primeru dobimo približno 220 fotonov Čerenkova na sled, od katerih se približno 59% siplje. Na območju  $\pm 3\sigma_\theta$  zaznanega kota Čerenkova to znese približno 1.8 enakomerno razmazanega ozadja zaradi prispevkov pod točko A. Ostali prispevki prispevajo veliko manj, in na koncu dobimo v okolici zaznanega kota Čerenkova približno 2 fotona/sled ozadja, na kar je naložen vrh s približno 15 fotoni/sled [1].



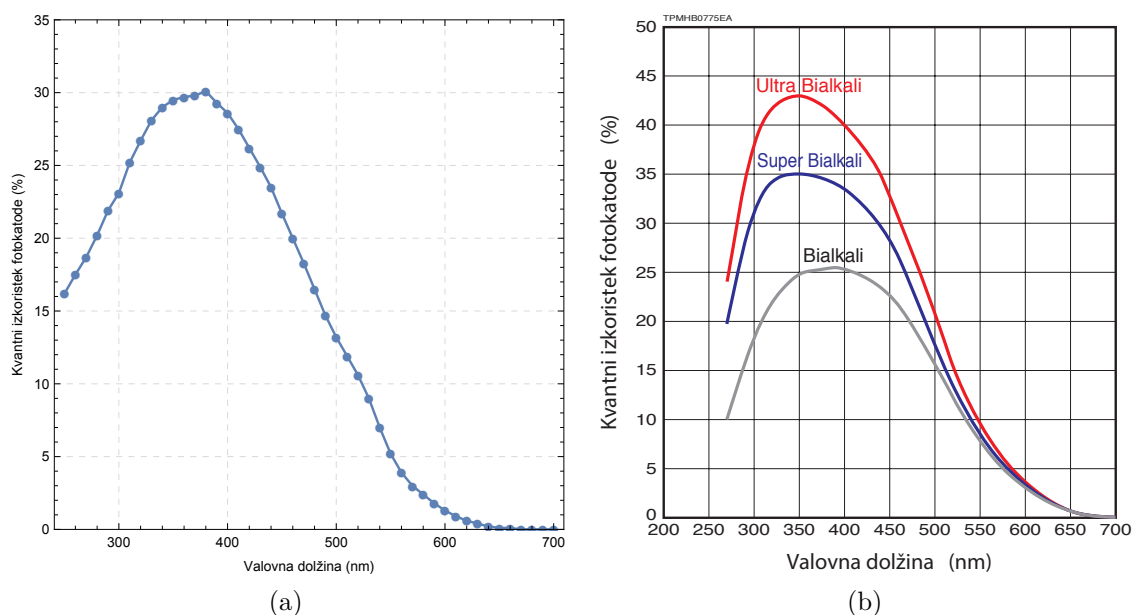
Slika 2.17: Izviri dodatnih prispevkov pri meritvah Čerenkovega kota, ki so posledica HAPD.

#### 2.4.4 Kvantni izkoristek fotokatode

Kvantni izkoristek fotokatode je definiran kot število iz fotokatode izsevanih fotoelektronov deljeno s številom vpadlih fotonov. Fotokatode z višjim kvantnim izkoristkom bodo izsevale več fotoelektronov in posledično prispevale k manjši napaki meritev  $\sigma_{sled}$  (enačba 2.8). Odvisnost kvantnega izkoristka fotokatode od valovne dolžine vpadnih fotonov za tipičen HAPD je prikazan na sliki 2.18a. Za primerjavo kvantnega izkoristka fotokatode HAPD-ja s tistim od fotokatod klasičnih fotopomnoževalk, je

dodana slika 2.18b. Proizvajalcu je do neke mere uspelo prenesti super bialkalno tehnologijo v proizvodnjo HAPD-jev, vendar maksimalnih izkoristkov zaradi razlik v proizvodnji še ne dosegajo. Razlika je, da morajo pri HAPD fotokatodo napariti na kvarčno okno posebej in jo nato združiti s silicijevimi čipi, medtem ko pri klasičnih fotopomnoževalkah naredijo vse v isti komori.

Tipičen maksimalni kvantni izkoristek se nahaja v okolici valovne dolžine 360 nm in znaša približno 30 %. Področje v okolici vrha se tako nahaja ravno pri valovnih dolžinah, kjer dobimo največ nesipanih fotonov Čerenkova.



Slika 2.18: Kvantni izkoristek fotokatode tipičnega HAPD-ja (a) v primerjavi s kvantnim izkoristkom fotokatod klasičnih fotopomnoževalk (b) v odvisnosti od valovne dolžine. Prirejeno po [11].

#### 2.4.5 Število zaznanih fotonov Čerenkova

Število zaznanih fotonov Čerenkova dobimo tako, da enačbo 2.15 pomnožimo z izkoristki našega detektorja

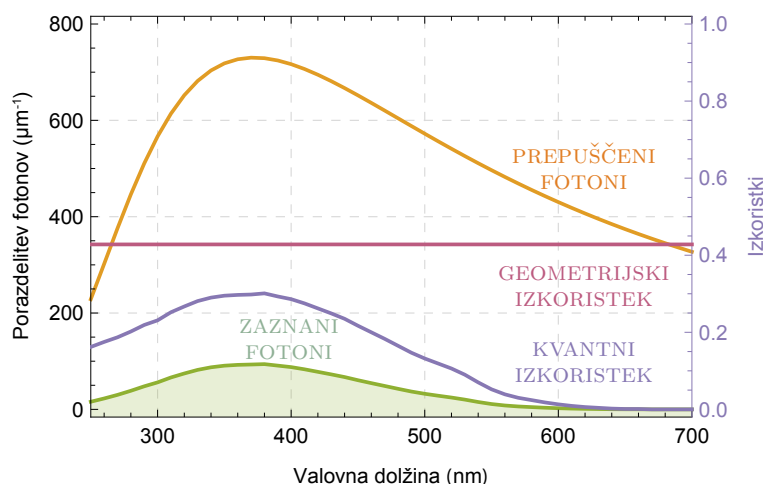
$$\frac{dN_{det}}{d\lambda} = \frac{2\pi\alpha z^2}{\lambda^2} \sin^2 \theta T(\lambda, l) \epsilon_e \epsilon_a \epsilon_t \epsilon_q(\lambda) dl, \quad (2.16)$$

kjer je



- $\epsilon_e$  učinkovitost zaznavanja fotoelektronov,
- $\epsilon_a$  delež aktivne površine HAPD,
- $\epsilon_t$  delež detektorske ravnine, pokrite s fotonskimi detektorji in
- $\epsilon_q(\lambda)$  kvantni izkoristek fotokatode HAPD.

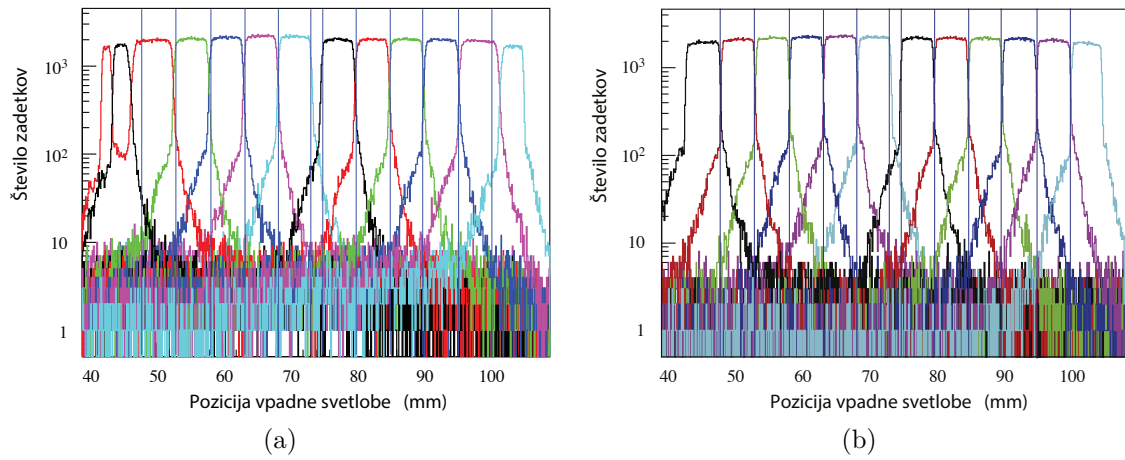
S tipičnim HAPD-jem bomo ob upoštevanju vseh izkoristkov zaznali zgolj slabih 10 odstotkov vseh izsevanih fotonov Čerenkova znotraj okna med 250 nm in 700 nm. To bi ob predpostavki, ki smo jo postavili na začetku poglavja 2.3.1.1, pomenilo detekcijo približno 45 fotonov/sled. Vendar se zaradi Rayleigovega sipanja ta številka še zmanjša na približno 15 fotonov/sled.



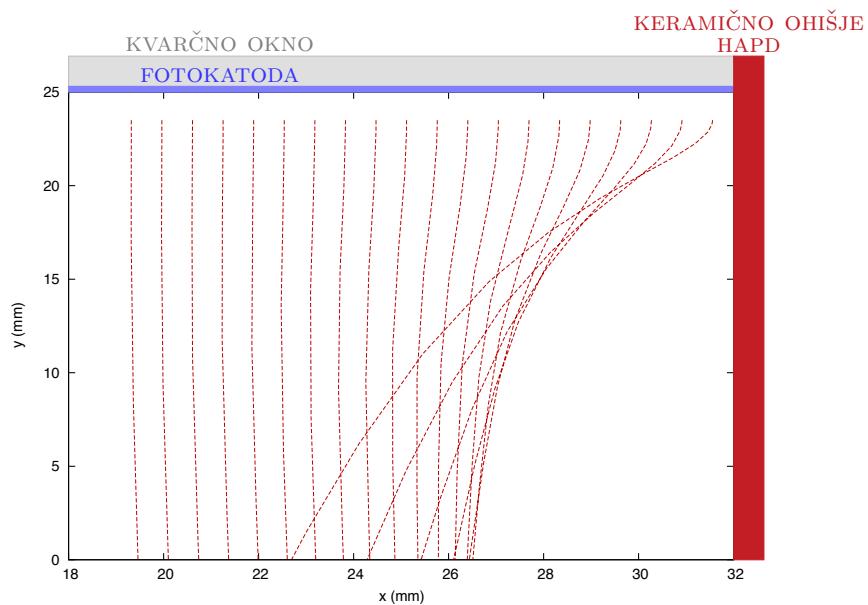
Slika 2.19: Prikaz porazdelitve prepuščenih fotonov iz aerogela (oranžna črta), geometrijskega izkoristka detektorja (rdeča črta), kvantnega izkoristka fotokatode (zeleno obarvana črta) in njihovega produkta (vijolična črta).

#### 2.4.6 Delovanje v magnetnem polju

Za detekcijo svetlobe v detektorju ARICH potrebujemo fotonski detektor, ki deluje v močnem magnetnem polju. HAPD temu pogoju ustreza, če je magnetno polje pravokotno na vstopno okno in v našem primeru to drži. Na sliki 2.20a je prikazan odziv ene vrstice senzorja HAPD na posamezne fotone v odvisnosti od pozicije vpadne svetlobe brez zunanega magnetnega polja. Vidimo, da se z izjemo robnih kanalov vsi enolično preslikajo. Pri robnih dveh vrstah kanalov se pojavijo težave, saj električno polje na robu detektorja ni popolnoma homogeno in ne kaže pravokotno navzdol od fotokatode do APD, temveč kaže bolj v notranjost. Zaradi tega fotoelektroni, ki nastanejo na robu fotokatode, pristanejo na notranjih celicah APD – njihove trajektorije so prikazane na sliki 2.21. Posledično se to izrazi v dodatnem vrhu predzadnje

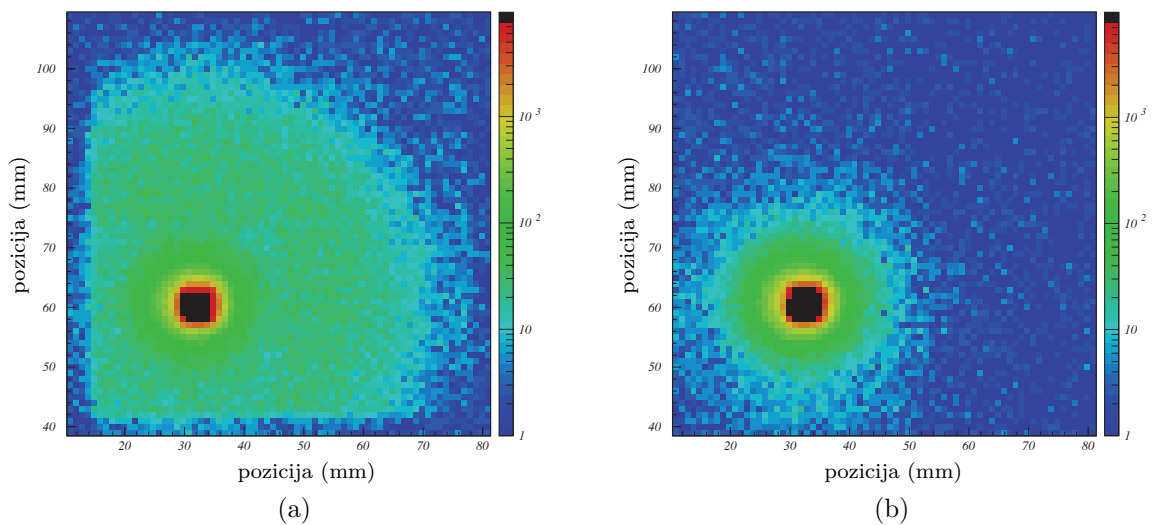


Slika 2.20: Porazdelitev zadetkov enodimenzionalne meritve po centrih kanalov ene vrste celic HAPD-ja brez (a) in z (b) magnetnim poljem gostote 1.5 T. Prirejeno po [12].



Slika 2.21: Ukrivljenost trajektorij fotoelektronov na robu HAPD zaradi nehomogenega električnega polja [13].

vrste celic in ožjem vrhu zadnje vrste celic (dvojni rdeči in ožji črni vrh na levi strani slike 2.20a). Opisana težava se v celoti popravi, če HAPD vstavimo v močno magnetno polje, ki kaže pravokotno na njegovo vstopno okno. Le to poskrbi, da fotoelektroni na svoji poti navzdol začno zavijati okrog magnetnih silnic in s tem nasprotujejo efektu zaradi električnega polja. Zamik fotoelektronov se v magnetnem polju z gostoto 1.5 T popravi iz začetnih 9 mm na okrog 0.1 mm [13]. To pa je v primerjavi z velikostjo celice (4.9 mm) zanemarljivo. To se lepo pokaže na sliki 2.20b, kjer vidimo, da pri isti meritvi v magnetnem polju dobimo 12 identičnih kanalov.



Slika 2.22: Signal iz celotnega HAPD-ja pri daljšem osvetljevanju ene celice brez (a) in z (b) magnetnim poljem gostote 1.5 T. Prirejeno po [1].

Magnetno polje poleg tega zmanjša tudi efekt povratnega sipanja fotoelektronov, kar se lepo vidi na sliki 2.22. Poskrbi namreč, da se fotoelektroni, ki se odbijejo od površja APD oziroma se povratno sipljejo, v svojem letu obrnejo tako, da jih zaznamo na celici, od katere so se odbili.

#### 2.4.7 Čitalna elektronika

Zaradi manjšega ojačanja HAPD potrebuje posebno elektroniko, ki omogoča detekcijo posameznih fotonov. Ob razvoju elektronskega vezja je bilo potrebno upoštevati, da:

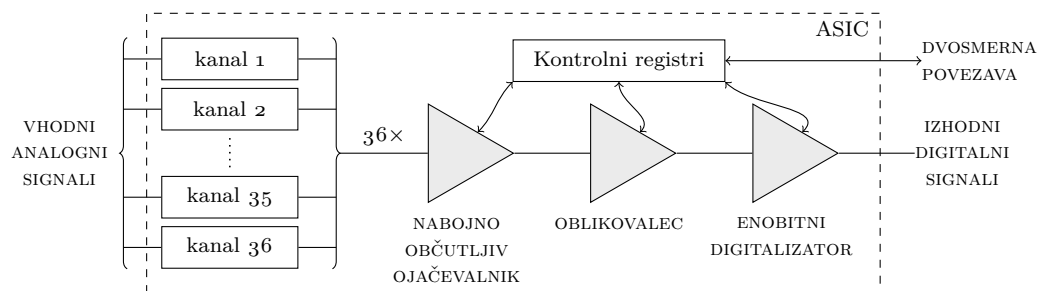
- A. ima nizek šum,
- B. je vezje sposobno digitalizirati majhne analogne signale iz HAPD,
- C. brez težav deluje v magnetnem polju z gostoto 1.5 T,

- Č. zaseda čim manjši prostor za HAPD-jem,
- D. meri temperaturo na obeh straneh elektronskega vezja
- E. in je sposobno nastavljati parametre integriranega vezja [14].

Čitalno elektroniko, ki ustreza vsem zahtevam in bo uporabljena v končni verziji detektorja ARICH, so razvili raziskovalci z *Instituta »Jožef Stefan«*. Sestavljajo jo štiri integrirana vezja (ASIC) in programabilno vezje (FPGA), poleg tega pa še komponente, ki skrbijo za nastavitve praga diskriminacije in nadzor vezja. Vsak od štirih ASIC čipov ima 36 kanalov, ki so sestavljeni iz

- A. nabojno občutljivega ojačevalnika, ki ojača šibke signale iz HAPD,
- B. oblikovalca signalov, ki signale oblikuje tako, da so primerni za nadaljnjo obdelavo in
- C. enobitnega digitalizatorja, ki pretvori analogne signale v digitalne.

Iz digitalizatorja do čipa FPGA tako pride le digitalni signal, ki je po dolžini enak času, ki ga analogni signal preživi nad pragom diskriminacije [15]. Shematski prikaz čipa ASIC se nahaja na sliki 2.23.



Slika 2.23: Shematski prikaz delovanja čipa ASIC.

Vrednosti ojačanja, oblikovanje sunkov in prag diskriminacije so skupni za vse kanale na čipu ASIC in jih lahko spreminjamo. To omogoča optimizacijo razmerja med signalom in šumom skozi celotno življenjsko dobo eksperimenta, kar je nujno, saj se bo zaradi visokih sevalnih doz delovanje HAPD-ja skozi čas spreminjalo. Prag diskriminacije lahko na čitalni elektroniki preko računalnika digitalno nastavljamo s 1024 koraki (10 bitov) med  $-2.5\text{ V}$  in  $2.5\text{ V}$ . Na enobitnem digitalizatorju prag diskriminacije torej nastavljamo kot

$$\text{prag diskriminacije (V)} = \frac{\text{register diskriminacije} - 2^9}{2^9} \times 2.5\text{ V}. \quad (2.17)$$

V nadaljevanju bo prag diskriminacije vedno podan v vrednostih registra, ki jih lahko v napetost spremenimo preko zadnje enačbe.

Vsakemu kanalu posebej lahko spreminjamo njegovo srednjo vrednost in s tem izenačimo ničelne vrednosti.

Poleg že omenjenih parametrov čitalne elektronike lahko njeno delovanje nastavljammo še z nastavitvijo drugih parametrov, ki so zbrani v tabeli 2.2 in 2.3. Z nekaterimi nastavljammo delovanje celotnega čipa, z nekaterimi pa le enega kanala.

Več o čitalni elektroniki si lahko bralec prebere v [15].

## 2.5 LOČLJIVOST PRI MERITVI KOTA ČERENKOVA

Dva prispevka, ki vplivata na natančnost meritve kota Čerenkova, že poznamo. To sta prispevka zaradi nepoznavanja točke izsevanja fotonov v aerogelu  $\sigma_{\theta}^{emp}$  (enačba 2.9) in končne velikosti fotonskega detektorja  $\sigma_{\theta}^{pix}$  (enačba 2.10). Za pione z gibalno količino 3.5 GeV/c v 2 cm debelem aerogelu  $l$  z lomnim količnikom 1.05, ki se nahaja 20 cm stran od fotonskega detektorja  $d$  z velikostjo celic 4.9 mm  $a$ , dobimo

$$\sigma_{\theta}^{emp} \approx 8.3 \text{ mrad in} \quad (2.18)$$

$$\sigma_{\theta}^{pix} \approx 6.4 \text{ mrad.} \quad (2.19)$$

K napaki prispevajo še disperzija lomnega količnika, nehomogenosti in nepravilnosti v aerogelu, ki skupaj znašajo

$$\sigma_{\theta}^{sev} \approx 3 \text{ mrad,} \quad (2.20)$$

ter prispevek napake rekonstrukcije sledi, ki je odvisen od gibalne količine nabitega delca in znaša med 6 mrad za hitre delce z gibalnimi količinami okrog 4 GeV/c in 10 mrad za počasne delce z gibalnimi količinami okrog 1 GeV/c.

Natančnost meritve kota Čerenkova dobimo tako, da v kvadratu seštejemo vse našete prispevke, in jih delimo s korenem števila zaznanih fotonov, ki smo jih v poglavju 2.4.5 ocenili na 15 fotonov/sled. S tem dobimo naš ključni parameter za ločevanje delcev

$$\sigma_{sledi} \approx 3.7 \text{ mrad.} \quad (2.21)$$

To pomeni, da pri gibalni količini 3.5 GeV/c (slika 2.3b) ločujemo kaone od pionov s približno  $8\sigma_{sledi}$ , kar ustreza naši prvotni zahtevi za ločevanje z vsaj  $4\sigma_{sledi}$ . Dejanska sposobnost ločevanja med delci je nekoliko slabša, saj pri zgornjih izračunih niso bili upoštevani prispevki ozadja (poglavje 2.4.3).

REGISTER	IME	FUNKCIJA
D[1:0]	PHASECMPS	kompensacija faze v vezju
D[3:2]	GAIN	ojačanje nabojno občutljivega ojačevalnika (3 = min, 0 = max)
D[5:4]	SHAPINGTIME	časovna konstanta oblikovalca (0 = min, 3 = max)
D[6]	COMPARATOR	izbira komparatorja (0 = unipolarni, 1 = bipolarni)
D[14:7]	VRDRIVE	omejitev toka
D[16:15]	MONITOR	izbira signala signala za monitor
D[25:17]	ID	identifikacijska številka čipa

Tabela 2.2: Seznam nastavljenih parametrov čipa ASIC.

REGISTER	IME	FUNKCIJA
D[2:0]	DECAYTIME	karakteristični čas predojačevalca (ni v uporabi)
D[6:3]	OFFSET	groba nastavitvev premika ničle
D[10:7]	FINEADJ_UNIPOL	fina nastavitvev premika ničle za unipolaren komparator
D[14:11]	FINEADJ_DIFF	fina nastavitvev premika ničle za bipolaren komparator
D[15]	—	rezervirano
D[16]	TPENB	omogoči testni pulz (1 = onemogoči, 0 = omogoči)
D[17]	KILL	onemogoči kanala (1 = onemogoči, 0 = omogoči)

Tabela 2.3: Seznam nastavljenih parametrov kanalov na čipu ASIC.

Del II

MERITEV LASTNOSTI SENZORSKIH MODULOV





---

## OPIS APARATURE

---

Za učinkovito delovanja detektorja obročev Čerenkova bo v sedmih koncentričnih krogih uporabljenih 420 fotoniskih senzorjev. Le-ti se bodo nahajali v notranjosti magneta med osrednjo potovalno komoro in elektromagnetnim kalorimetrom. To pomeni, da bo enostaven dostop do njih posledično nemogoč. Ključnega pomena je torej, da vse detektorje pred vgradnjo obširneje stestiramo in ugotovimo njihove karakteristike. To nam poleg tega omogoča, da vgradimo samo tiste, ki bodo zagotovo delovali brezhibno. Poleg tega lahko s poznavanjem karakteristik izberemo optimalnejšo postavitev; na primer: enakomerna razporeditev serije HAPD-jev z višjimi kvantnimi izkoristki po celotni površini in ne zgolj na eno mesto.

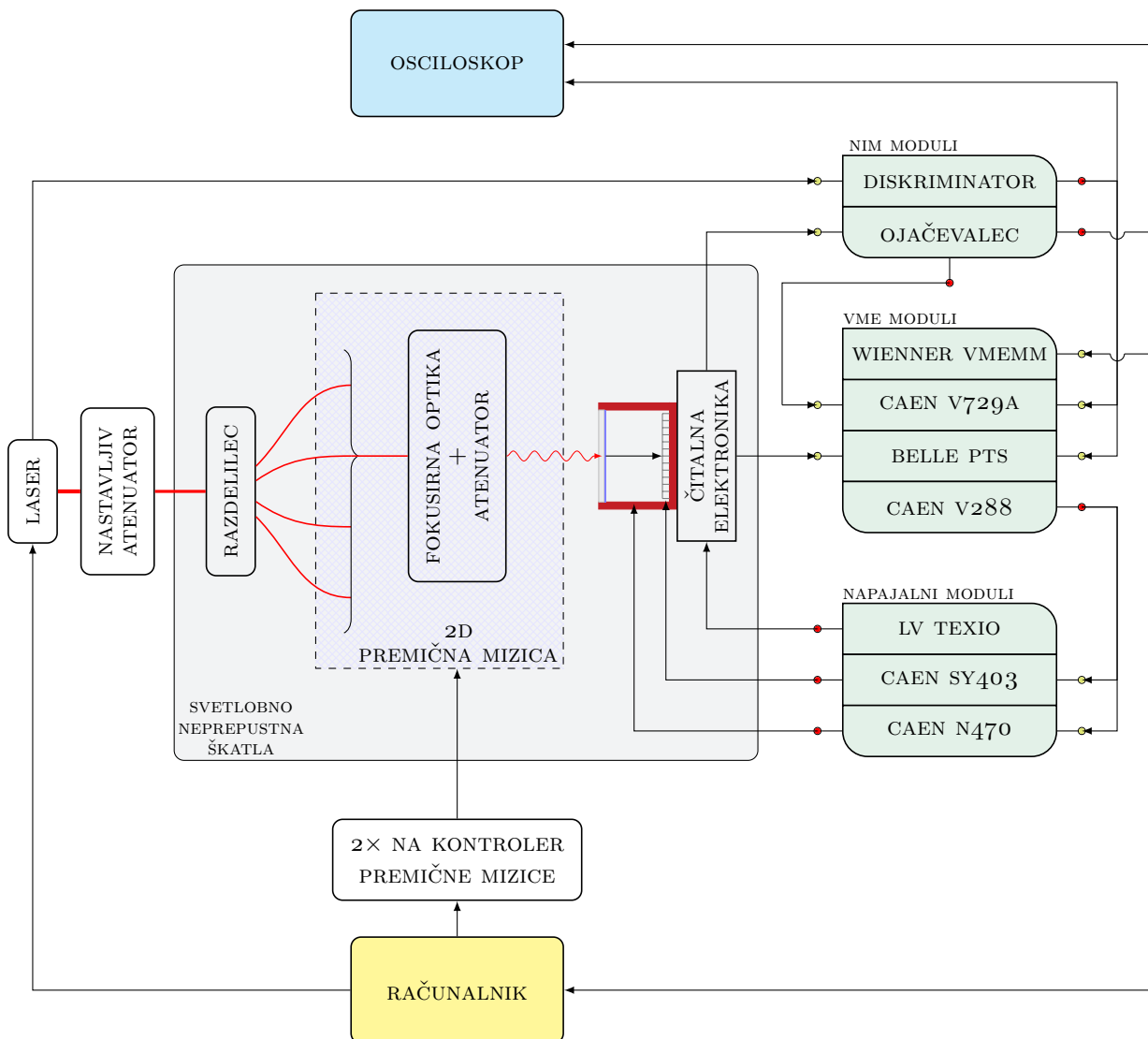
Moja naloga na *Institutu »Jožef Stefan«* je bila postaviti aparaturo, ki lahko hkrati na štirih HAPD-jih izvede:

- A. umeritev srednjih vrednosti elektronskih kanalov na čipih ASIC s priključenimi HAPD-ji,
- B. meritev časovne odvisnosti velikosti signala (meritev “waveform”) po centrih vseh kanalov,
- C. meritev števila sunkov kot funkcija praga diskriminacije (“threshold” meritev) po centrih vseh kanalov in
- Č. meritev pozicijske občutljivosti detektorja HAPD z in brez visoke napetosti.

### 3.1 ZGRADBA APARATURE

Preden smo lahko pričeli z meritvami, smo sestavili merilno aparaturo po shemi 3.1.

Štiri HAPD-je s pripadajočo čitalno elektroniko smo namestili na nosilec znotraj svetlobno nepropustne škatle. Postavitev v temnem okolju je nujno potrebna, saj so delujoči HAPD-ji občutljivi že na posamezne fotone in bi jih z normalno sobno osvetlitvijo uničili. Najprej smo poskrbeli za pravilno napajanje HAPD-jev in čitalne elektronike. Vsak HAPD potrebuje dva različna tipa napetosti: zaporno (okrog 350 V)



Slika 3.1: Shema postavitve celotnega poskusa.

in visoko (okrog 8 kV). Vsakega od štirih čipov APD moramo priklopiti na svojo zaporno napetost, poleg tega pa potrebujemo še skupno napetost zaščitnega pasu, ki poskrbi za zaščito APD čipov pred površinskimi tokovi. Za štiri zaporne in zaščitno napetost smo poskrbeli s 64-kanalnim napajalnim sistemom CAEN SY403, za visoko napetost pa s 4-kanalnim modulom CAEN N470. Oba smo nadzirali s komunikacijsko enoto CAEN V288, ki je bila nameščena v ohišju s standardom VME [16]. Z napajalnikom TEXIO PW18-1.8AQ pa smo napajali čitalno elektroniko s 3.8 V in 210 mA,  $-2.1$  V in  $-360$  mA, ter 2.1 V in 330 mA.

Zelo kratke laserske sunke smo generirali z lasersko enoto in jih po atenuaciji z nastavljivim atenuatorjem po optičnem vlaknu THORLABS P1-405B-FC-1 speljali v

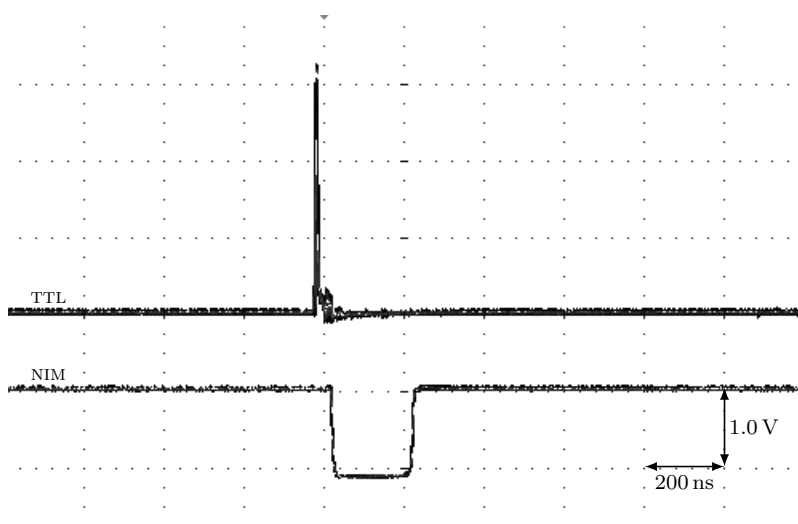
svetlobno neprepustno škatlo, kjer smo ga priklopili z razdelilcem laserske svetlobe THORLABS FCQ632-APC. Le-ta je razdelil žarek v štiri optična vlakna, ki smo jih nato speljali do fokusirne optike, s katero smo nastavili goriščno razdaljo na površino fotokatod HAPD-jev. Ker razdelilec laserskega žarka ni razdelil na enake snope, smo jih še dodatno atenuirali. Vsi štirje izhodi so bili pritrjeni na dvodimenzionalno premično mizico NATIONAL APERTURE MM-4M-EX-140, s katero smo lahko premikali laserski žarek po celotni površini HAPD-jev z natančnostjo do  $1.0\ \mu\text{m}$ . Krmilili smo jo s pomočjo dveh kontrolerjev NATIONAL APERTURE MICROMINI, ki sta bila povezana z računalnikom.

Iz čitalne elektronike dobimo dve vrsti izhodnih signalov: analogne in digitalne. Analogne smo ojačali za faktor 4.5 na ojačevalcu ORTEC 574 in jih nato peljali na analogno digitalni pretvornik naboja VME CAEN V729A. Digitalne signale pa smo peljali na modul VME BELLE PTS.

Vse module, nameščene v ohišju s standardom VME, smo nadzirali s komunikacijskim modulom WIENNER VMEMM, ki je skrbel tudi za obojestransko povezavo z računalnikom. Na računalniku smo za zbiranje in nadziranje meritev uporabljali programsko opremo LabWindows/CVI proizvajalca National Instruments.

Za zajem podatkov z enotama V729A in PTS potrebujemo prožilni signal laserja. Tega na njiju nismo mogli speljati neposredno, saj na vhodu potrebujeta logiko NIM [17], prožilni signal pa uporablja elektronski signal TTL [17]. Prožilni signal smo zato napeljali na diskriminator ORTEC CG8000, ki je poskrbel za ustrezno pretvorbo (slika 3.2)

Analogni in digitalni kontrolni signal iz čitalne elektronike smo skupaj s prožilnimi signali iz diskriminatorja priklopili tudi na osciloskop, preko katerega smo



Slika 3.2: Prožilni signal na vhodu (zgornja črta) in izhodu (spodnja črta) diskriminatorja.

lahko brez računalnika opazovali signale iz HAPD (slika 3.3). Iz obeh izhodov lahko jasno razločimo enofotonske (analogni nižji vrh, digitalni ožji odziv) in dvofotonske (analogni višji vrh, digitalni širši odziv) odzive, ter signal zaradi šuma (ravna črta pri obeh izhodih). Dolžina digitalnega signala je enaka času, ki ga analogni preživi nad pragom diskriminacije, kar nakazujejo pomožne črne črte na sliki.

Podrobnosti o delovanju čitalne elektronike, signalih iz nje ter komunikaciji z računalnikom si lahko bralec prebere v [15].

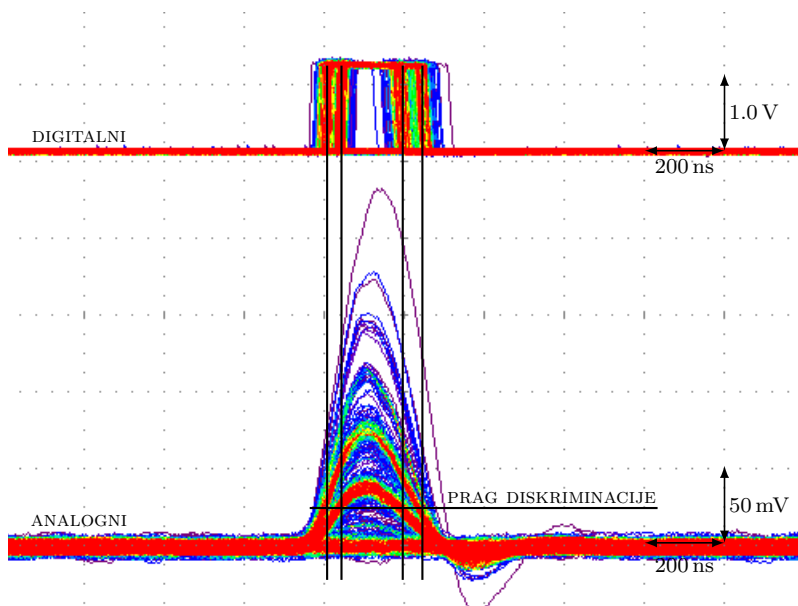
### 3.1.1 Izbira laserja

Pri izbiri laserja je pomembno vlogo igrala enodimenzionalna meritev pozicijske občutljivosti po centrih vrstic in stolpcev kanalov. S to meritvijo enostavno preverimo delovanje celic na APD čipih. Znotraj HAPD-ja je nehomogeno električno polje (poglavje 2.4.6), ki je v nekaterih HAPD-jih tako močno, da signala na robovih HAPD sploh ne zaznamo. Zato smo se odločili, da bomo to meritev izvajali tudi brez priključene visoke napetosti z neposredno osvetlitvijo plazovne fotodiode. Pri takšni meritvi potrebujemo laser z močno intenziteto svetlobe, ki bo v polprevodniku ustvaril dovolj primarnih parov, da nadomestimo predojačanje. Poleg tega igra pomembno vlogo tudi izbira valovne dolžine, saj sta od nje odvisna kvantni izkoristek fotokatode in absorpcija svetlobe v APD-ju.

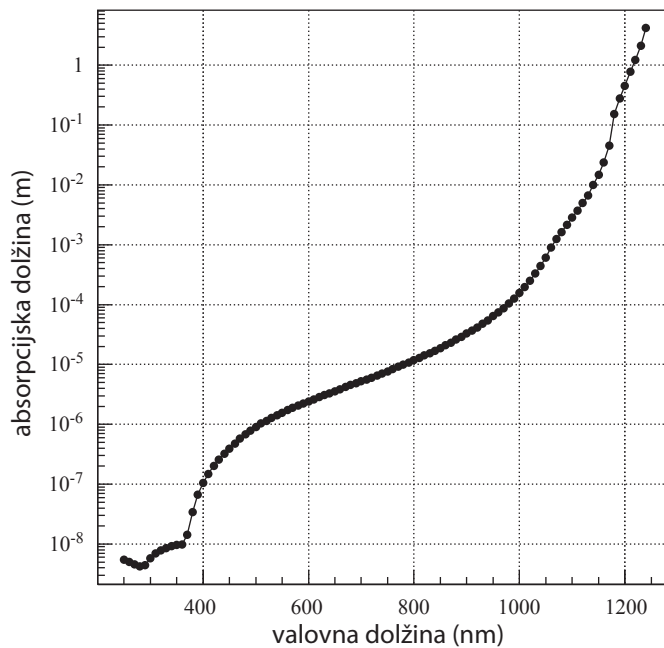
	MODRA SVETLOBA (400 nm)	ZELENA SVETLOBA (550 nm)	RDEČA SVETLOBA (700 nm)
kvantni izkoristek fotokatode (%)	30	9	<1
absorpcijska dolžina v APD (m)	$10^{-7}$	$2 \times 10^{-6}$	$8 \times 10^{-6}$

Tabela 3.1: Izbira primerne valovne dolžine laserja.

Iz tabele 3.1 vidimo, da je modra svetloba zelo primerna za normalno delovanje HAPD, saj ima HAPD vrh pri kvantnem izkoristku v okolici valovne dolžine 400 nm. Na žalost pa bi bilo merjenje z njo brez visoke napetosti zelo težko, saj se velik delež fotonov absorbira v siliciju APD pred aktivnim področjem (slika 3.4, absorpcijska dolžina v siliciju je reda velikosti  $10^{-7}$ ). Njeno nasprotje je rdeča svetloba. Z njo bi lahko brez težav detektirali svetlobo brez priklopljene visoke napetosti, saj v siliciju prodre veliko globlje in brez težav doseže aktivno področje. Pri meritvah z visoko napetostjo bi potrebovali visoko intenziteto svetlobe, da bi zaradi izjemno nizkega kvantnega izkoristka (slika 2.18a) iz fotokatode z zaznavno verjetnostjo izbili kakšen fotoelektron. To bi pomenilo, da bi ves čas zaznavali zelo močen direkten signal.



Slika 3.3: Analogni in digitalni signal na osciloskopu. S pomožnimi belimi črtami je vrisana njuna povezava.



Slika 3.4: Absorpcijska dolžina svetlobe v siliciju [18].

V želji, da bi uporabljali samo en izvor laserske svetlobe, smo izbrali laser PARTICULARS LA-01 R z zeleno diodo THORLABS LP520-SF15 z valovno dolžino 520 nm. Z njim smo generirali nekaj nano sekund dolge laserske sunke s frekvenco 3.5 kHz. Z nastavljenim atenuatorjem smo v primeru meritev z visoko napetostjo atenuirali žarek s pomočjo nevtralnega filtra za 99.7%, v primeru meritev brez visoke napetosti pa žarka nismo dodatno atenuirali.

To nam je omogočilo, da smo v prvem primeru gledali odziv HAPD-jev na svetlobo v načinu delovanja z visoko napetostjo, v drugem pa preverjanje delovanja brez visoke napetosti, da smo preverili še robne kanale, ki jih drugače v odsotnosti magnetnega polja ne bi mogli.

### 3.1.2 Nastavitev intenzitete svetlobe

Začetne težave, na katere smo naleteli, je povzročal razdelilec laserskega žarka, saj ga ni razdelil na štiri enake dele. Odziv HAPD na vsak del (poimenovani z A, B, C in D) pri meritvi posameznih fotonov je prikazan na sliki 3.5a. Z dodatno atenuacijo prvih treh žarkov (A – C) smo izenačili odzive. To smo naredili z dodatnimi nevtralnimi filtri, ki smo jih privili na navoje fokusirne optike posameznih laserskih žarkov (slika 3.6).

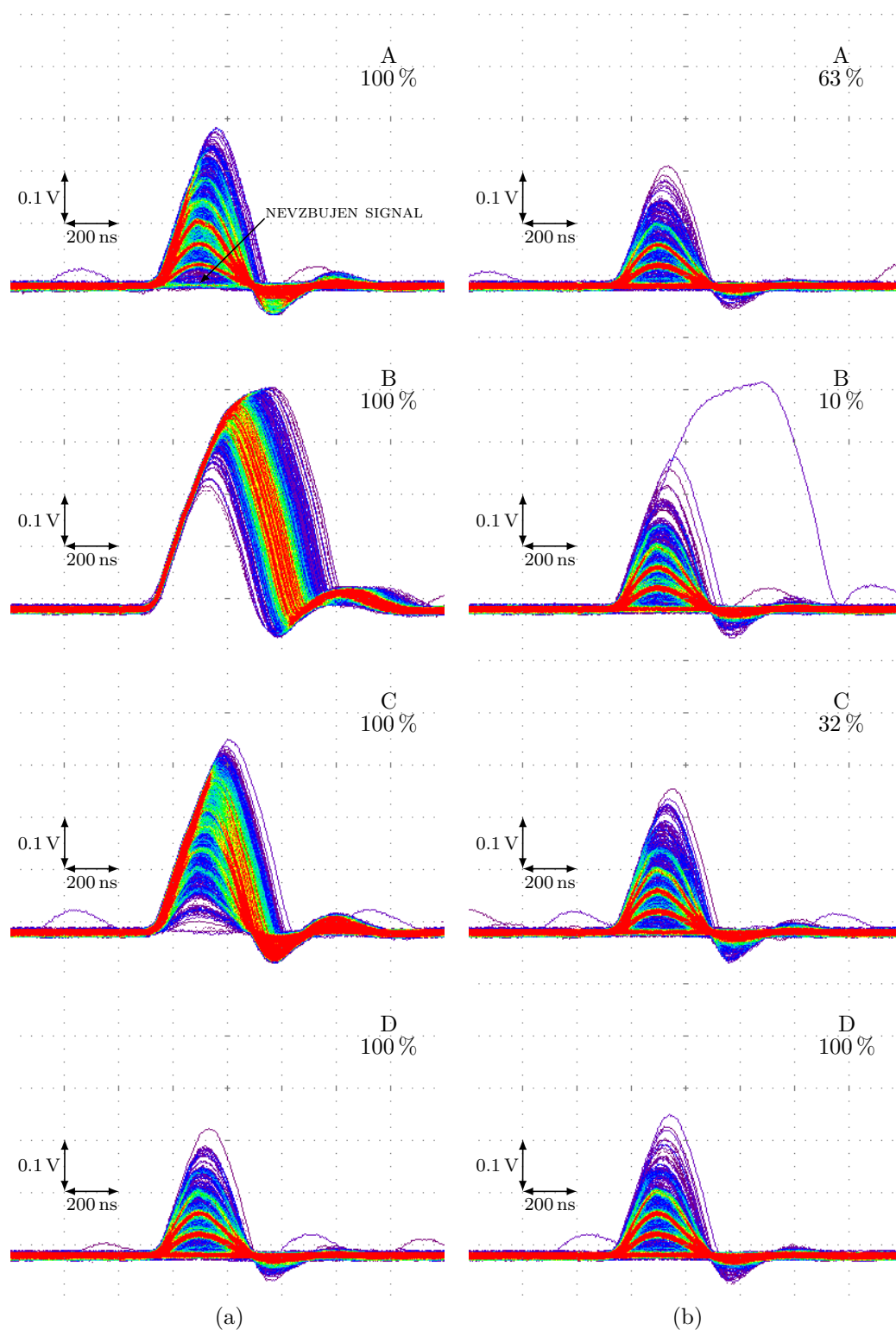
- A. Žarek A bi že skoraj bil primeren za uporabo, vendar je bilo povprečno število fotonov preveliko. Da smo ga izenačili z nivojem najšibkejšega žarka D, smo ga atenuirali na 63% začetne vrednosti.
- B. Žarka B in C sta že v osnovi bila tako močna, da sta v celoti zasičila signal in onemogočila meritve. Zato smo ju atenuirali na 10% in 32% začetne vrednosti.
- C. Žarek D je bil pa ravno primeren za meritve in ga ni bilo potrebno dodatno atenuirati. Uporabili smo ga kot referenco za ostale.

Signali posameznih žarkov po njihovi atenuaciji so prikazani na sliki 3.5b.

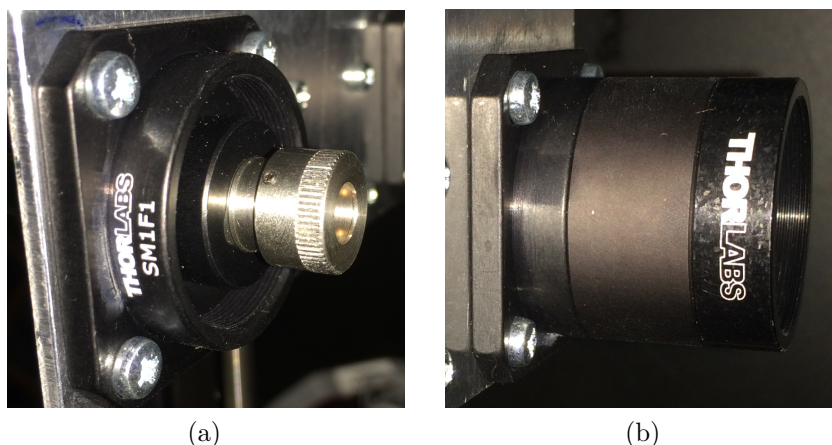
### 3.1.3 Napetosti

Vsem HAPD-jev, ki smo jih testirali, smo nastavili napetost zaščitnega pasu na priporočenih 175 V in visoko napetost na 7 kV. Zaporno napetost pa smo nastavili na vrednosti, pri katerih ima APD čip faktor plazovnega ojačanja približno 30. Le-te smo razbrali iz specifikacij, ki so jih za vsak izdelani HAPD izmerili pri *Hammamatsu Photonics* in se nahajajo v okolici 300 V. Primer ene od takšnih meritev plazovnega ojačanja v odvisnosti od zaporne napetosti je prikazan na sliki 2.15b.

Ker je delovanje HAPD-jev močno odvisno od priklopljenih napetosti, smo med meritvami z računalnikom na vsakih nekaj sekund iz napajalnih modulov odčitavali



Slika 3.5: Intenzitete posameznih laserskih žarkov (a) pred in (b) po atenuaciji žarkov pri meritvi posameznih fotonov.

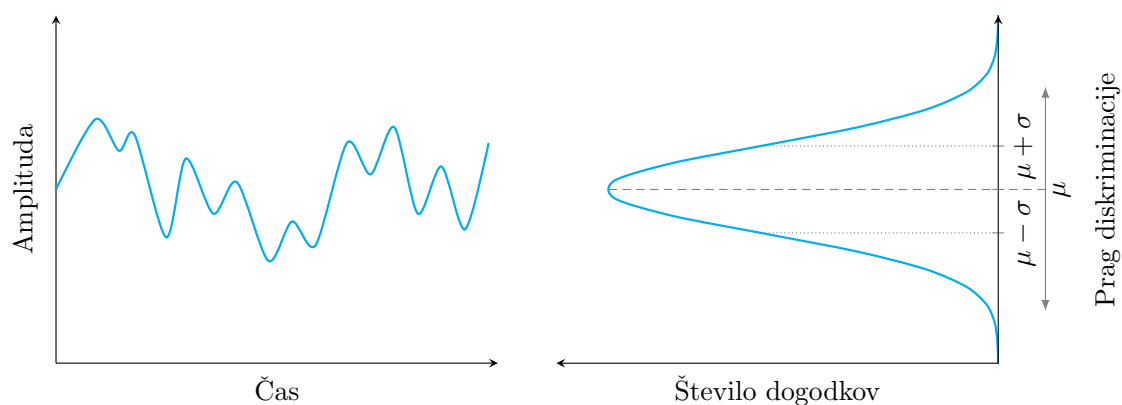


Slika 3.6: Fotografija fokusirne optike brez (a) in z (b) atenuatorjem.

nastavljene vrednosti. Tako smo preverjali, da med meritvami ni prihajalo do velikih odstopanj zaradi nihanj v napetostih. O konstantnem napajanju se bralec lahko prepriča na sliki A.1 v dodatku A.

### 3.2 UMERITEV SREDNJIH VREDNOSTI KANALOV

Signal posameznega kanala neosvetljene merilne naprave (leva stran slike 3.7) je posledica šuma iz elektronike ter HAPD-ja in je normalno porazdeljen okrog srednje vrednosti  $\mu$  s standardno deviacijo  $\sigma$  (desna stran slike 3.7). Srednje vrednosti šuma kanalov se med seboj razlikujejo zaradi razlike med posameznimi kanali čitalne elektronike [15]. Ker je merilni prag diskriminacije skupen za celoten čip, moramo

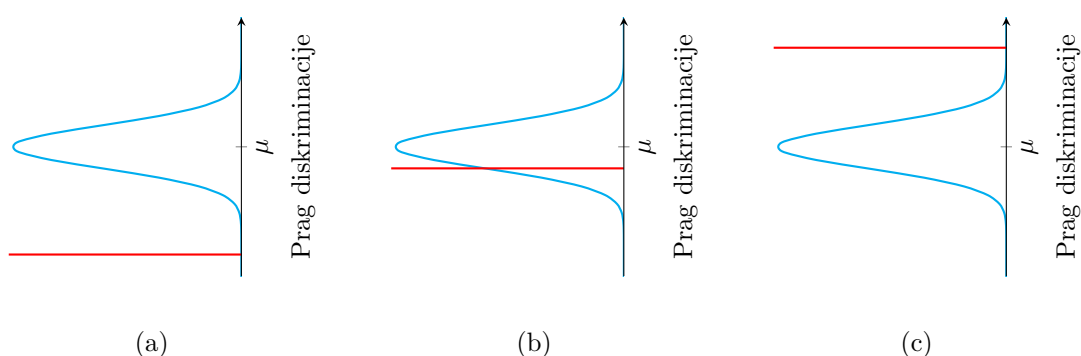


Slika 3.7: Shematski prikaz signala enega kanala neosvetljene merilne naprave (levo) in njegove porazdelitve (desno).

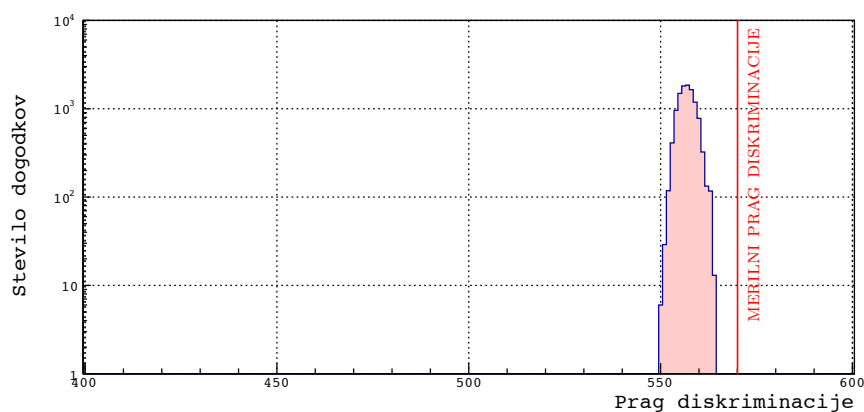


pred meritvami izenačiti srednje vrednosti vseh kanalov. To naredimo z nastavitvami srednjih vrednosti posameznih kanalov na čipih ASIC (poglavje 2.4.7).

Na čitalno elektroniko smo z računalnikom naložili privzete vrednosti in nanjo priklopili HAPD. Brez osvetljevanja smo nato 2000-krat pri vsakem pragu diskriminacije beležili, koliko krat dobimo prehod signala iz merilne naprave čez prag diskriminacije (beležili smo torej število prehodov). V primeru, da smo s pragom diskriminacije precej pod srednjo vrednostjo šuma (slika 3.8a), ne zabeležimo nobenega prehoda. Ko se s pragom diskriminacije približujemo šumu (slika 3.8b), z vsakim korakom do  $\mu$  zabeležimo večje število prehodov. Z nadaljnjim višanjem praga diskriminacije število prehodov pada, vse dokler ne pridemo nad šum (slika 3.8c), od koder naprej ponovno več ne dobimo prehodov.



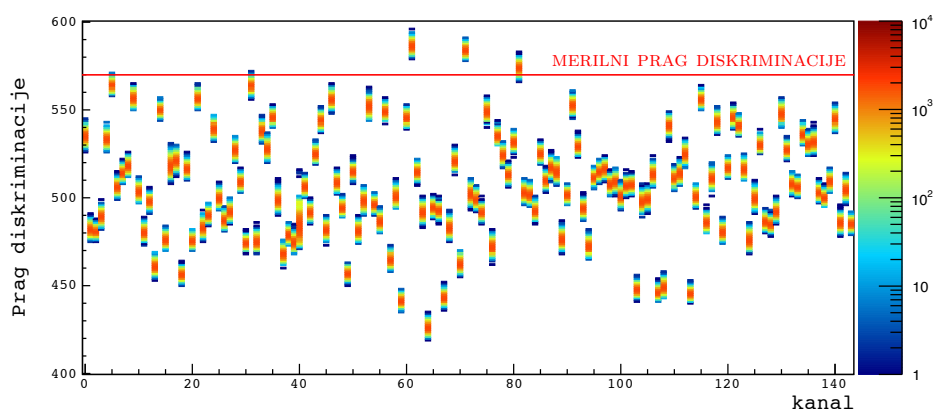
Slika 3.8: Z rdečo črto je vrisan trenutni prag diskriminacije, s turkizno črto pa porazdelitev signala.



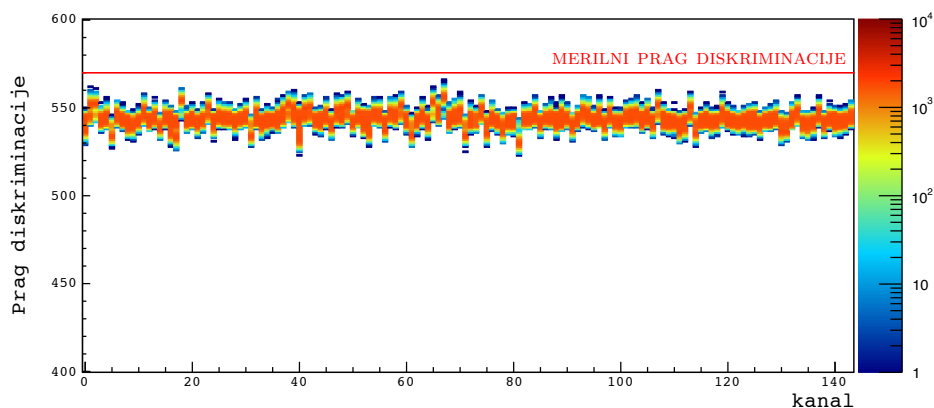
Slika 3.9: Odziv enega kanala merilne naprave v odvisnosti od praga diskriminacije.

Rezultat meritve za en kanal je v logaritemski skali prikazan na sliki 3.9. Meritev smo naključno sprožili ter gledali odziv digitalnega signala. Primer odziva vseh 144

kanalov merilne naprave je prikazan na sliki 3.10a. Če bi s tako nastavljeno elektroniko želeli zaznavati svetlobo, bi bile meritve zaradi skupnega merilnega praga diskriminacije močno odvisne od kanala, na katerem bi merili. S prilagajanjem Gaussovih funkcij na vseh 144 kanalov dobimo njihove srednje vrednosti  $\mu$  in standardne deviacije  $\sigma$  in jih nato z nastavitvami ustreznih parametrov čitalne elektronike zamaknemo na željeno ničelno vrednost, ki se nahaja pod merilnim pragom diskriminacije. Meritev smo ponovili, njen rezultat je prikazan na sliki 3.10b. Sedaj se vsi kanali nahajajo pod merilnim pragom diskriminacije (rdeča črta), tako da dobimo signale le v primeru, da je signal višji od merilnega praga diskriminacije. Z umeritvijo smo torej izenačili pogoje za detekcijo svetlobe na celotni merilni napravi.



(a)



(b)

Slika 3.10: Odziv vseh 144 kanalov HAPD pred (a) in po (b) umeritvi v odvisnosti od praga diskriminacije. Vrteni merilni prag diskriminacije (rdeča črta) predstavlja prag za umeritev elektronike, ki smo ga nato uporabljali pri nadaljnjih meritvah.

Na sliki 3.10 so na  $x$  osi navedeni elektronski kanali, katerih fizično pozicijo lahko razberemo iz slike 3.11, na kateri je predstavljen pogled iz zadnje strani.

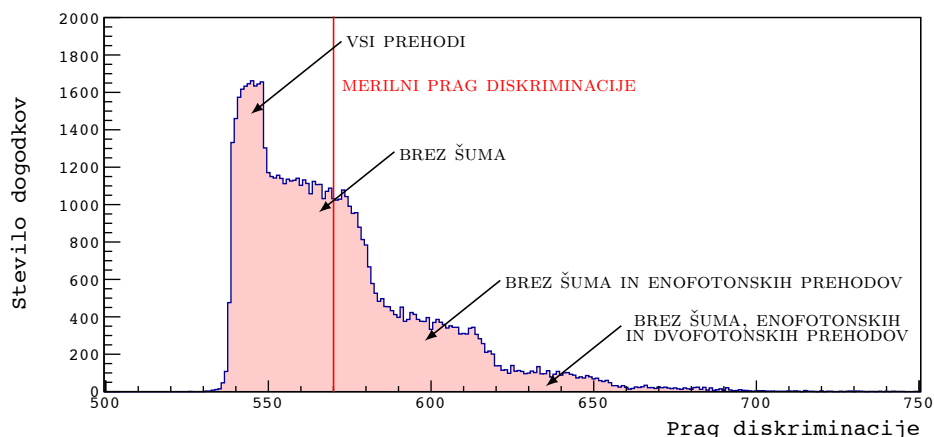
10	126	131	138	143	128	137	41	48	38	43	50	54
	122	127	134	139	129	132	44	49	42	47	55	59
	115	119	123	135	141	133	45	37	46	51	62	66
8	110	114	118	130	142	136	40	39	58	63	67	71
	120	121	109	111	108	140	52	36	70	69	57	56
6	113	116	117	112	124	125	53	68	64	61	60	65
	101	96	97	100	104	89	17	16	4	9	8	5
4	92	93	105	106	72	88	32	0	3	1	13	12
	107	103	99	94	75	76	28	34	22	10	6	2
2	102	98	87	82	73	81	25	33	27	15	11	7
	95	91	83	78	85	80	24	21	31	26	19	14
0	90	86	79	74	84	77	29	20	35	30	23	18
	0	2	4	6	8	10						

Slika 3.11: Shematski prikaz povezave med številko in pozicijo kanala iz zadnje strani.

### 3.3 MERITEV ŠTEVILA SUNKOV V ODVISNOSTI OD PRAGA DISKRIMINACIJE

Pri meritvah v detektorju obročev Čerenkova bomo preverjali samo, ali je signal nad merilnim pragom diskriminacije, ali ne. Da je to mogoče, moramo poskrbeti, da je prag nastavljen dovolj nad nivojem šuma in pod nivojem enofotonskih signalov. Zato smo tukaj izvajali meritev števila sunkov v odvisnosti od praga diskriminacije. Meritev poteka podobno kot pri umeritvi srednjih vrednosti kanalov. Osvetljevali smo centre kanalov in nato 2000-krat izmerili število sunkov v odvisnosti od praga diskriminacije, ki smo ga v korakih po 1 spreminjali od 500 do 750. Odziv enega kanala na osvetljevanje s svetlobo nizke intenzitete je prikazan na sliki 3.12. Pri pragu diskriminacije do približno 520 ne dobimo signala, saj smo pod nivojem signalov. Do praga diskriminacije približno 550 dobimo vse prehode, ki so posledica ali šuma ali fotonov, naprej od tega pa samo signale, ki so posledica slednjih. Zmanjšanje števila sunkov v okolici praga diskriminacije 580, 620 in 660 se pojavi, ker tam dvignemo prag diskriminacije nad nivo enofotonskih, dvofotonskih in trifotonskih signalov.

Pri meritvi digitalnega signala dobimo odziv vseh 144 kanalov HAPD-ja hkrati. Na sliki 3.13 je prikazana ena izmed 144 takšnih meritev, pri kateri smo svitili na kanal številka 72.



Slika 3.12: Meritev odziva posameznega kanala HAPD na svetlobo nizke intenzitete v odvisnosti od praga diskriminacije. Z rdečo črto je vrisan merilni prag diskriminacije, ki smo ga uporabljali pri meritvah pozicijske občutljivosti.

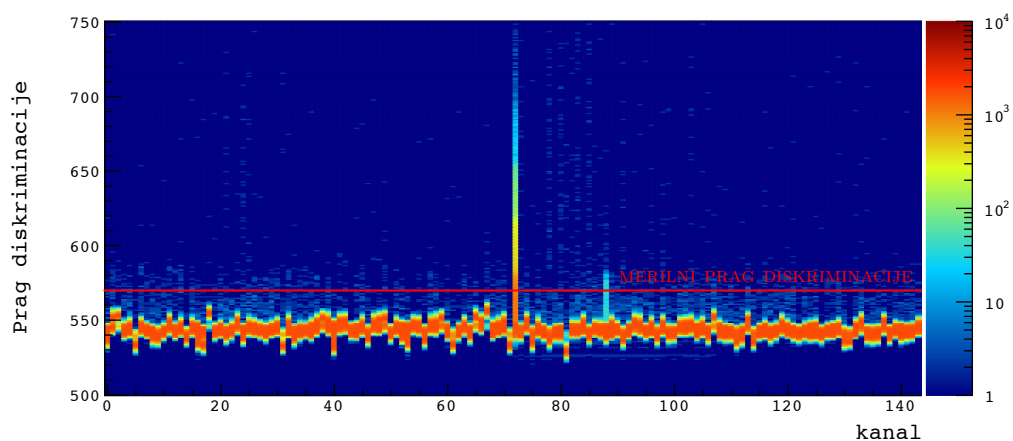
Laserski žarek premikamo po centrih kanalov, odzive vseh 144 meritev osvetljenih kanalov pa zberemo v dvodimenzionalni histogram na sliki 3.14. Vidimo, da so odzivi na enofotonske signale lepo homogeni, saj so vsi prehodi zbrani med pragom diskriminacije 580 in 590. Večfotonski signali so že bolj razmazani, vendar nas to ne moti, saj nas bo pri končnih meritvah zanimala le prisotnost signala. Prazni stolpci predstavljajo 44 robnih kanalov, iz katerih ne dobimo signala (poglavje 2.4.6).

Iz te meritve lahko izluščimo razmazanost  $\sigma_d$  ojačanja  $G_d$  digitalnega signala vseh kanalov na detektorju. Ojačanje definiramo kot razliko med pozicijo vrha šuma  $x_0$  in pozicijo prehoda med enofotonskimi in dvofotonskimi signali  $x_1$

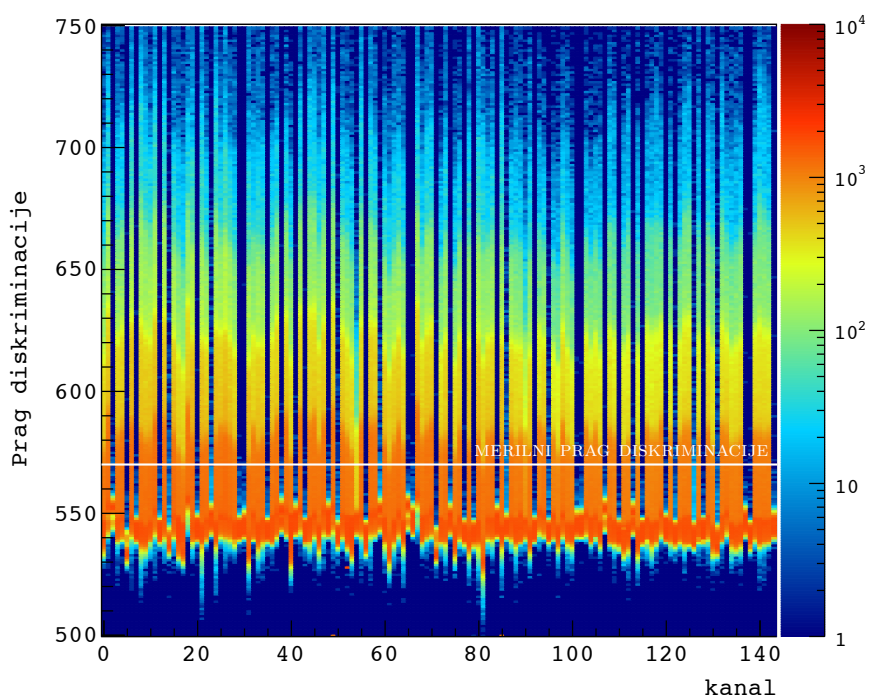
$$G_d = x_1 - x_0. \quad (3.1)$$

Za izračun pozicije vrha šuma nismo prilagodili Gaussove funkcije, kot pri umeritvi srednjih vrednosti kanalov (poglavje 3.2), saj kanali več niso nekorelirani, ampak dobijo sklopitev, ki se izrazi kot razširitev prehoda v bolj škatlasto obliko. Zato smo za vsak HAPD izvedli še meritev števila sunkov v odvisnosti od praga diskriminacije, kjer nismo osvetljevali nobenega kanala. Iz nje smo dobili težišče šuma  $x_0$  in standardno deviacijo njegove porazdelitve  $\sigma_0$ , ki smo ju nato uporabili pri računanju ojačanja. Za določitev pozicije prehoda med enofotonskimi in dvofotonskimi signali smo prilagajali »kompletno error funkcijo«  $\operatorname{erfc}$ , naloženo na polinom prve stopnje.

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\pi} \int_x^\infty e^{-t^2} dt \quad (3.2)$$

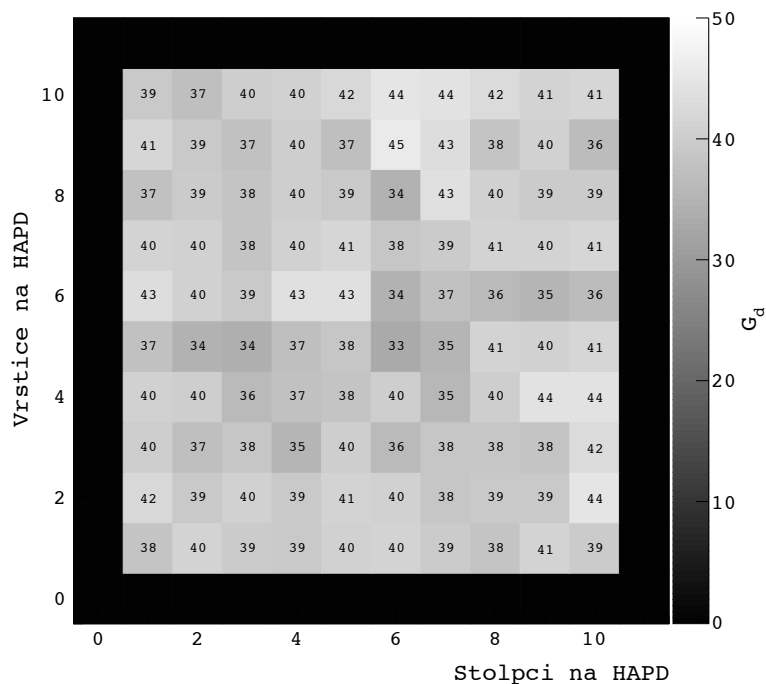


Slika 3.13: Meritev odziva HAPD v odvisnosti od praga diskriminacije. Pri meritvi smo s svetlobo nizke intenzitete osvetljevali samo en kanal na HAPD-ju. Z rdečo črto je vrisan merilni prag diskriminacije, ki smo ga uporabljali pri meritvah pozicijske občutljivosti.



Slika 3.14: Odziv osvetljenih kanalov HAPD v odvisnosti od praga diskriminacije. Z belo črto je vrisan merilni prag diskriminacije, ki smo ga uporabljali pri meritvah pozicijske občutljivosti.

Iz slike 3.15, na kateri je prikazano ojačanje vseh kanalov HAPD-ja s serijsko številko ZJ5296, se lahko ponovno prepričamo o homogenosti ojačanja fotonskega senzorja. Črna barva predstavlja kanale, katerim nismo izračunali ojačanja.

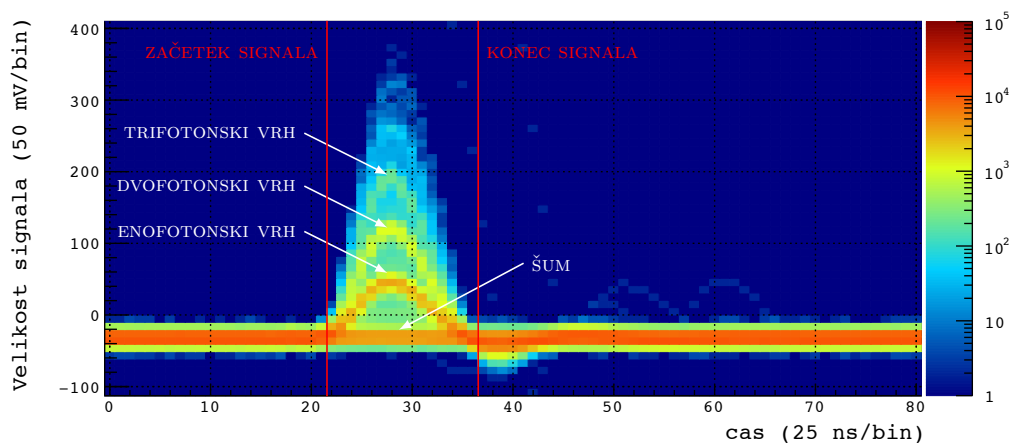


Slika 3.15: Dvodimenzionalni prikaz ojačanja digitalnega signala HAPD-ja ZJ5296. S številkami in črno-belo skalo je prikazana vrednost ojačanja kanala  $G_d$ .

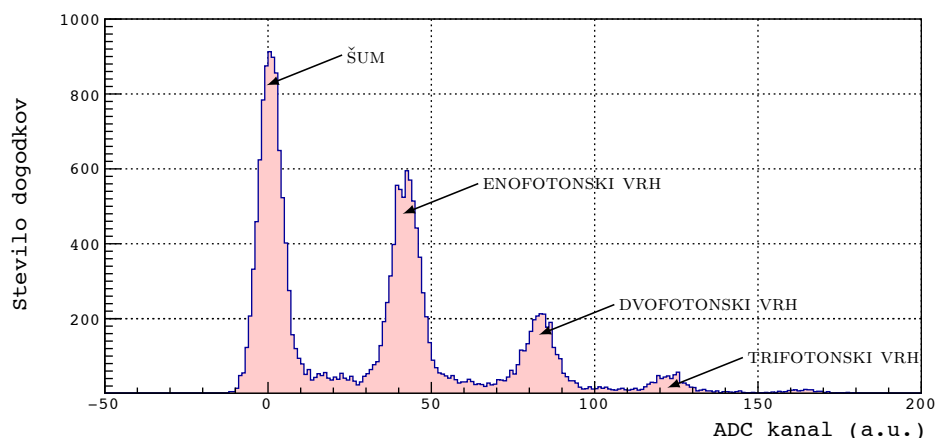
Rezultati izmerjenih petih HAPD-jev so zbrani v tabeli 3.2.

### 3.4 MERITEV ČASOVNE ODVISNOSTI VELIKOSTI SIGNALA

Meritev časovne odvisnosti velikosti signala smo izvedli z modulom CAEN V729A, s katerim smo na 25 ns digitalizirali kontrolni analogni signal (napetost), ki smo ga merili v centrih kanalov. Digitalizirani analogni signal je prikazan na sliki 3.16a. Na vsakem kanalu smo odčitali 20000 signalov. Takšna meritev omogoča preverjanje samo enega kanala na HAPD-ju naenkrat, zato se pri zajemu podatkov v Belle II ARICH ne bo opravljal. Izvajali smo jo zato, ker so njeni rezultati enakovredni rezultatom, pridobljenim z meritvijo števila sunkov v odvisnosti od praga diskriminacije. S tem smo v našem poskusu opravljali dvojno preverjanje vseh izmerjenih rezultatov in preverjanje pravilnega delovanja čitalne elektronike, ter sistemov za odčitavanje signalov.



(a)



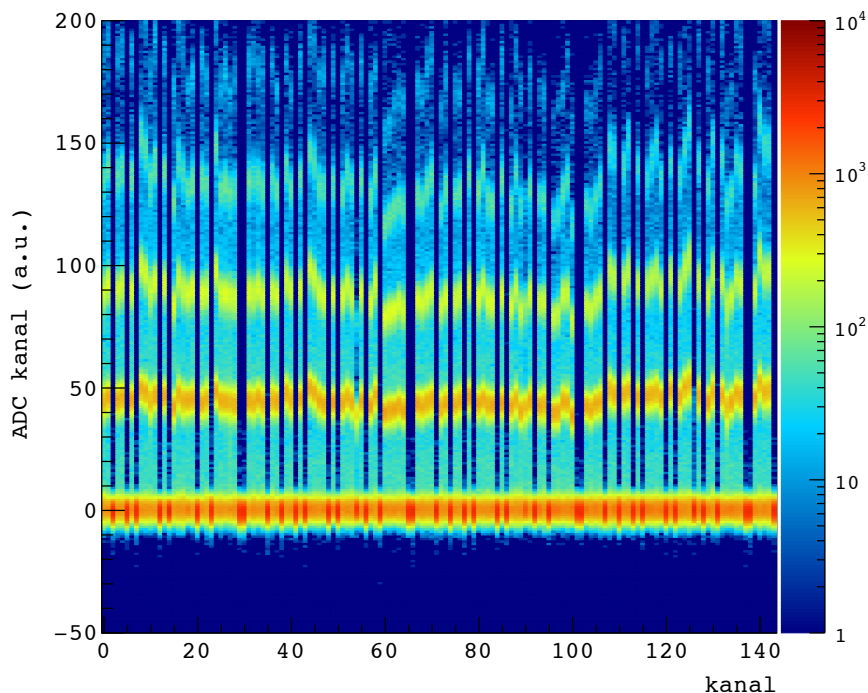
(b)

Slika 3.16: Časovna odvisnost velikosti signala iz HAPD (a) in pripadajoča porazdelitev naboja (b).

Z integracijo področja pod posameznim vrhom dobimo porazdelitev naboja (slika 3.16b), iz katere lahko določimo ojačanje in občutljivost kanala.

Odzivi vseh 144 kanalov na meritev časovne odvisnosti velikosti signala so zbrani v dvodimenzionalnem histogramu na sliki 3.17, kjer prazni stolpci predstavljajo robne kanale, na katerih nismo dobili signala (poglavje 2.4.6). Vidimo, da so odzivi na enofotonske signale tudi pri tej meritvi homogeni.

Iz te meritve lahko dobimo razmazanost  $\sigma_a$  ojačanja  $G_a$  analognega signala za vse kanale, preko katerih bomo preverjali delovanje HAPD-jev. Pozicijo vrha šuma  $x_0$  in enofotonskega vrha  $x_1$  dobimo s prilagajanjem Gaussove funkcije. V primeru, da je standardna deviacija prevelika (večja od recimo 10% vrednosti ojačanja), moramo



Slika 3.17: Porazdelitev dogodkov po velikosti signala za vse kanale detektorja HAPD ZJ5296.

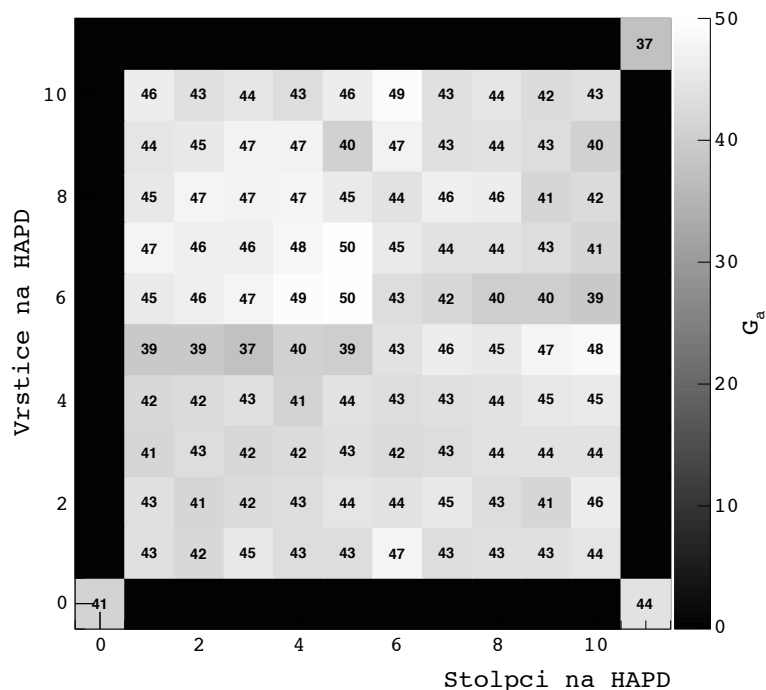
SERIJSKA ŠTEVILKA	$G_d$	$\sigma_d$	$G_a$	$\sigma_a$
KA166	39.5 (85)	3.7	44.4 (100)	3.2
ZJ5296	39.0 (98)	2.7	44.5 (100)	2.5
ZJ5319*	39.9 (80)	4.6	44.7 (73)	1.9
ZJ5574*	40.0 (85)	4.0	45.3 (99)	4.8
ZJ5587	38.7 (92)	3.7	43.6 (99)	3.0

Tabela 3.2: Ojačanje petih preverjenih HAPD-jev preko meritve števila sunkov v odvisnosti od praga diskriminacije. Številke v oklepajih predstavljajo število kanalov, uporabljenih za izračun ojačanja. \* Meritev števila sunkov v odvisnosti od praga diskriminacije brez osvetljevanja kanalov ni bila izvedena, zato smo težišče šuma  $x_0$  digitalnih meritev določili iz meritev z osvetljevanjem, kar se kaže v večji  $\sigma_d$ .



preveriti, ali je to posledica napačno nastavljenih zapornih napetosti, ali napake v HAPD-ju.

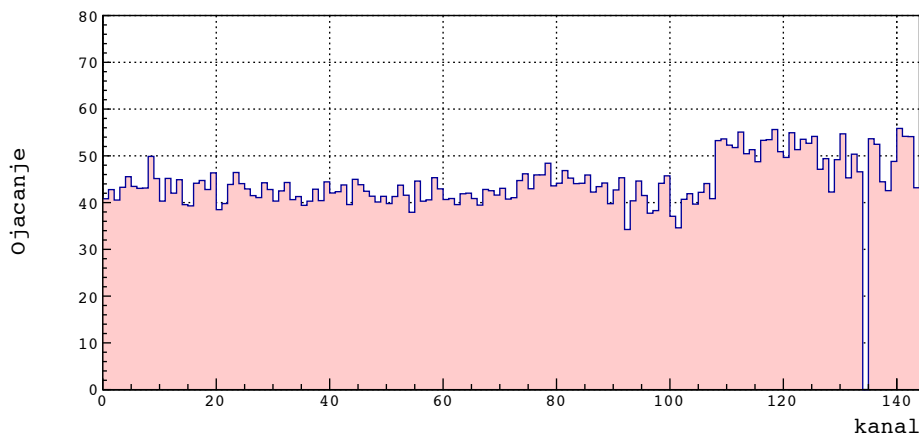
Na sliki 3.18 je v dvodimenzionalnem histogramu prikazano ojačanje analognega signala za vse kanale HAPD-ja s serijsko številko ZJ5296. Kot v histogramu v prejšnjem poglavju tudi tukaj vidimo, da je analogno ojačanje homogeno preko celotnega sensorja. Črna barva označuje kanale, ki jim nismo mogli izračunati ojačanja.



Slika 3.18: Dvodimenzionalni prikaz ojačanja analognega signala HAPD-ja ZJ5296. S številkami in črno-belo skalo je prikazana vrednost ojačanja kanala  $G_a$ .

Podatki za 5 preverjenih HAPD-jev so zbrani v tabeli 3.2. Težave je povzročal samo HAPD ZJ5574, ker smo enemu APD čipu nastavili previsoko zaporno napetost. To se vidi na sliki 3.19, kjer ima zadnjih 36 kanalov občutno višje ojačanje kot ostali.

Pri nekaterih senzorjih efekt nehomogenega električnega polja ni tako visok, da ne bi dobili nič signala na robnih kanalih. Zato smo pri HAPD ZJ5574 ojačanje lahko izračunali tudi za njih. Edini prazen stolpec, za katerega nismo izračunali ojačanja, je posledica nedelujočega kanala.

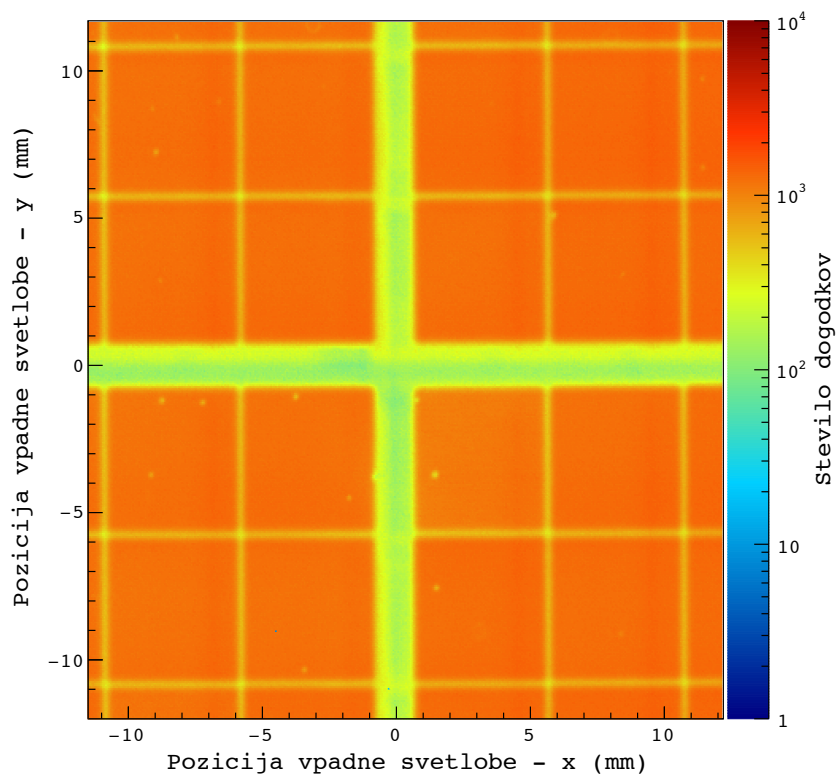


Slika 3.19: Ojačanje vseh 144 kanalov detektorja HAPD ZJ5574, dobljeno iz kontrolnega analognega signala.

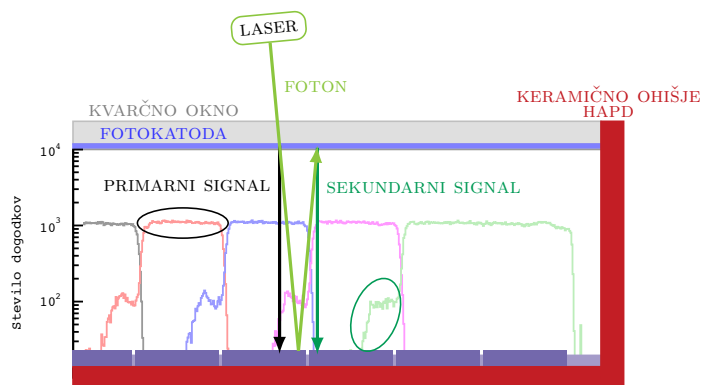
### 3.5 POZICIJSKA OBČUTLJIVOST HAPD

Z meritvijo pozicijske občutljivosti smo preverjali površinsko občutljivost senzorjev HAPD. Meritev je potekala tako, da smo z dvodimenzionalno premično mizico laserski žarek premikali po površini sensorja in merili odziv vseh kanalov pri vključeni visoki napetosti, ter nato šteli zadetke v odvisnosti od pozicije. Na sliki 3.20 je v dvodimenzionalnem histogramu prikazana površinska občutljivost sensorja v okolici njegove sredine, kjer smo mizico v obeh smereh premikali s korakom  $60\ \mu\text{m}$  in na vsaki poziciji signal odčitali 2000-krat. V primeru, da je bil signal višji od merilnega praga diskriminacije, smo število zadetkov v histogramu povečali za 1. Z meritvami smo začeli v točki s koordinatama  $x_{min}$  in  $y_{min}$  (spodnji levi kot slike) ter nato s korakom  $60\ \mu\text{m}$  preverili vse točke do  $x_{max}$  in  $y_{min}$  (spodnji desni kot slike). Za tem smo mizico vrnili v točko  $x_{min}$  in  $y_{min}$ , ji za  $60\ \mu\text{m}$  povišali koordinato  $y$  in meritev ponovili. To smo ponavljali dokler nismo prišli do točke s koordinatama  $x_{max}$  in  $y_{max}$  (zgornji desni kot slike). Iz slike je lepo razvidna občutljivost kanalov, majhna neaktivna površina med njimi in približno  $1.6\ \text{mm}$  širok pas neaktivne površine med APD čipi, kar ustreza specifikacijam. Majhne pike na kanalih, kjer je viden padec v občutljivosti, so posledica nepravilnosti v strukturi fotokatode.

Da bi na tak način preverili površinsko občutljivost celotnega sensorja, bi potrebovali približno 2 tedna za vsak senzor. Zato smo naredili poenostavitev in s korakom  $130\ \mu\text{m}$  mizico premikali samo v eni smeri od minimalne do maksimalne koordinate, v drugi pa samo po centrih kanalov. Število meritev odzivov smo obdržali pri 2000. Na sliki 3.22a sta prikazani meritvi po stolpcih (zgoraj) in vrsticah (spodaj) pri vključeni visoki napetosti, kjer različne barve predstavljajo signale iz različnih kanalov. Vsi kanali kažejo homogeno delovanje, saj smo brez velikih odstopanj na



Slika 3.20: Pozicijska občutljivost HAPD na svetlobo nizke intenzitete v okolici sredine senzorja.



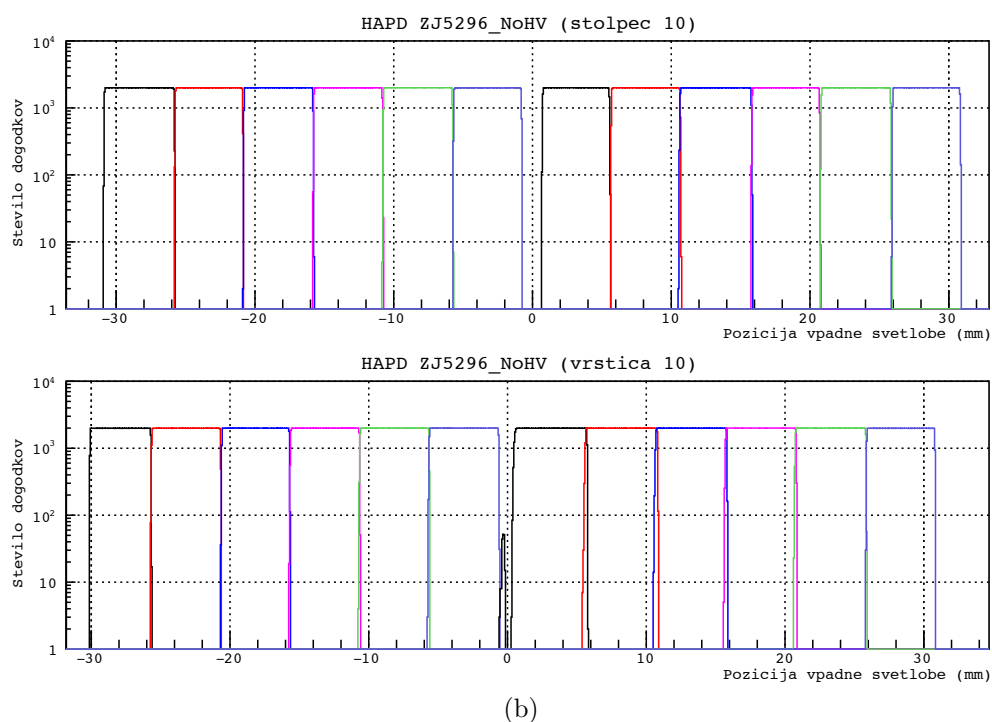
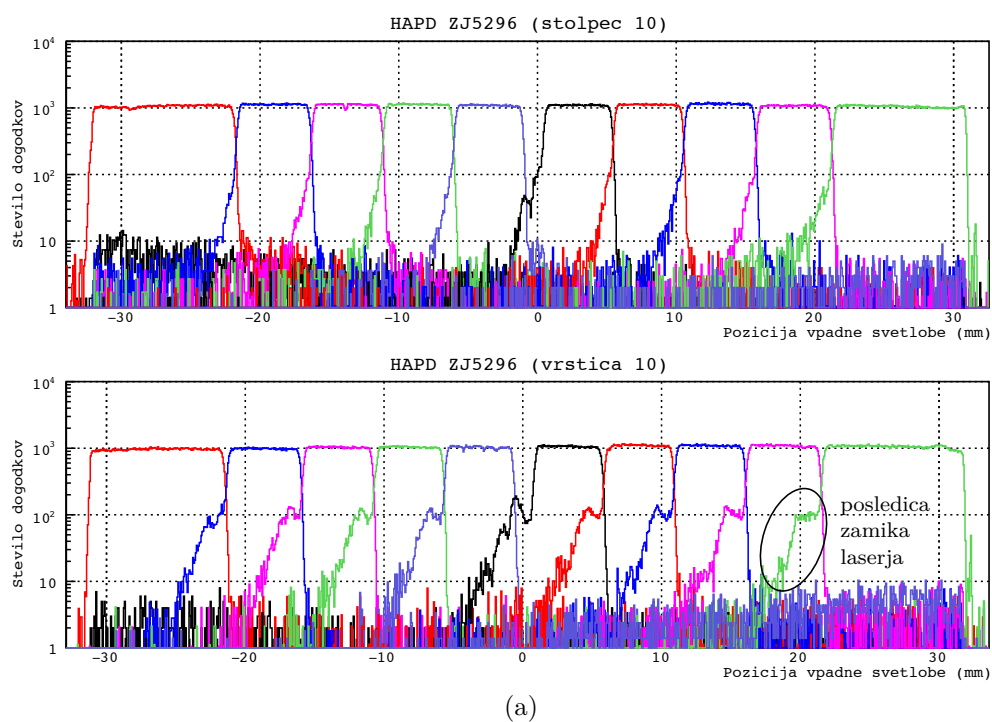
Slika 3.21: Shematska razlaga dolgih repov pri enodimenzionalni meritvi pozicijske občutljivosti HAPD.

vseh ne robnih kanalih zaznali približno 1000 signalov. Iz meritev vidimo, da so notranji kanali med seboj ločeni za približno 0.5 mm. Od tega 0.2 mm pripada fizičnemu razmaku med kanali, 0.15 mm na kanal širini laserskega snopa. Nehomogeno električno polje (poglavje 2.4.6) nam preprečuje, da bi na takšen način preverili tudi robne kanale. Zelo dolgi repi meritev na levi strani kanalov kažejo, da naš laserski žarek ni bil pravokoten na fotokatodo HAPD. Le-ti so namreč posledica skozi fotokatodo prepuščenih fotonov, ki se odbijejo od APD in nato izbijajo dodatne fotoelektrone, ki sprožijo (sekundarni) signal tudi na sosednjem kanalu. Shematsko je efekt razložen na sliki 3.21. Razlika v dolžini repov med meritvijo po vrsticah in stolpcih kaže, da je bila naša dvodimenzionalna premična mizica bolj zasukana v smeri x (smer vrstic), kot pa v smeri y (smer stolpcev). Ker se primarni in sekundarni signal razlikujeta vsaj za faktor 10, na test delovanja to ne vpliva, zato vpadnega kota svetlobe nismo spreminjali.

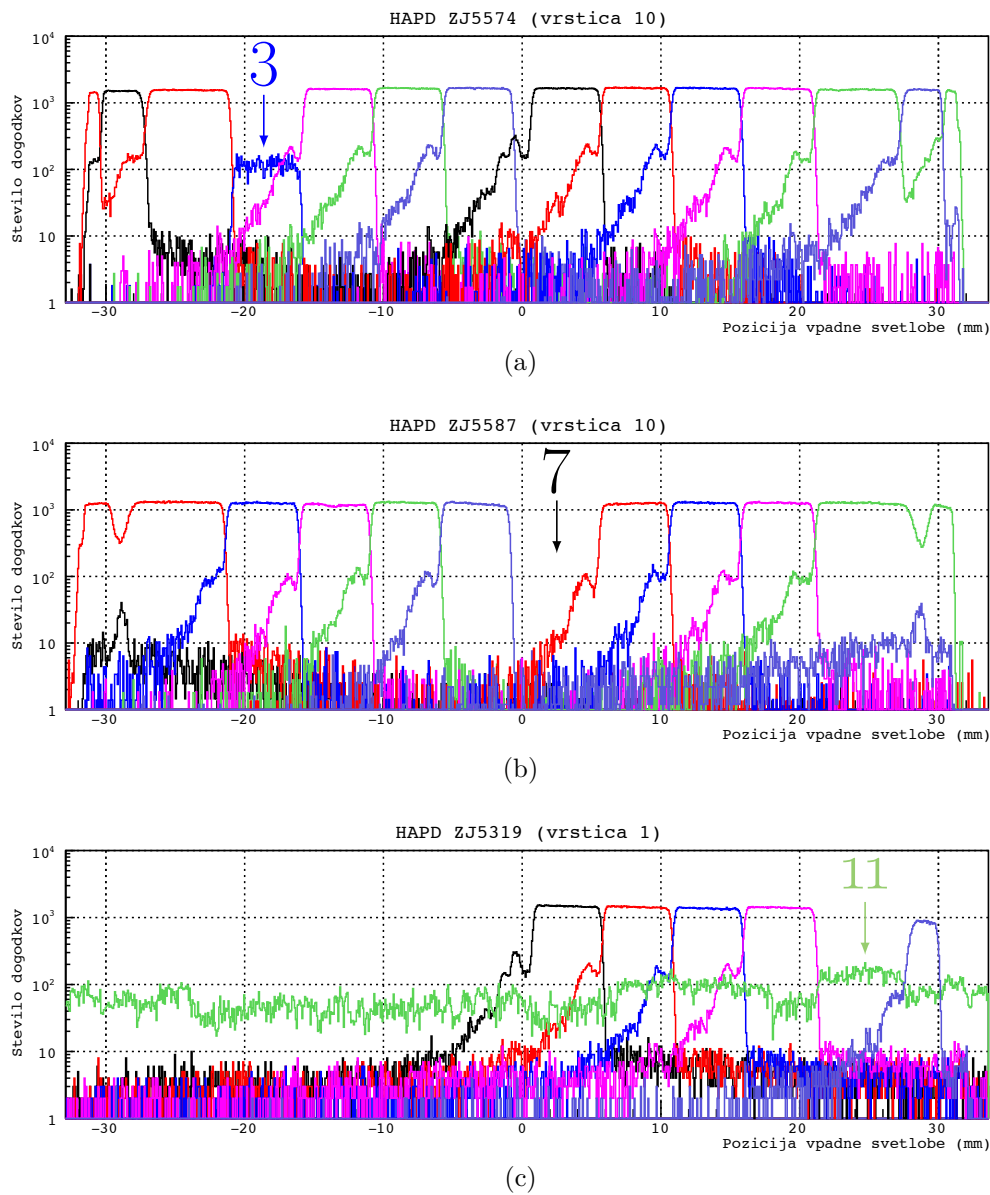
Meritev brez priključene visoke napetosti z močnejšo intenziteto laserske svetlobe je prikazana na sliki 3.22b. V takšnem načinu delovanja lahko brez težav preverimo delovanje robnih kanalov.

S temi meritvami lahko odkrijemo nedelujoče, slabo delujoče in tudi šumeče kanale, ki so posledica napak v proizvodnji, npr. slab stik čitalne elektrode ali elektrode z zaporno napetostjo in nečistoče v siliciju. Vsi trije primeri, ki jih lahko odkrijemo na HAPD-jih, so prikazani na sliki 3.23.

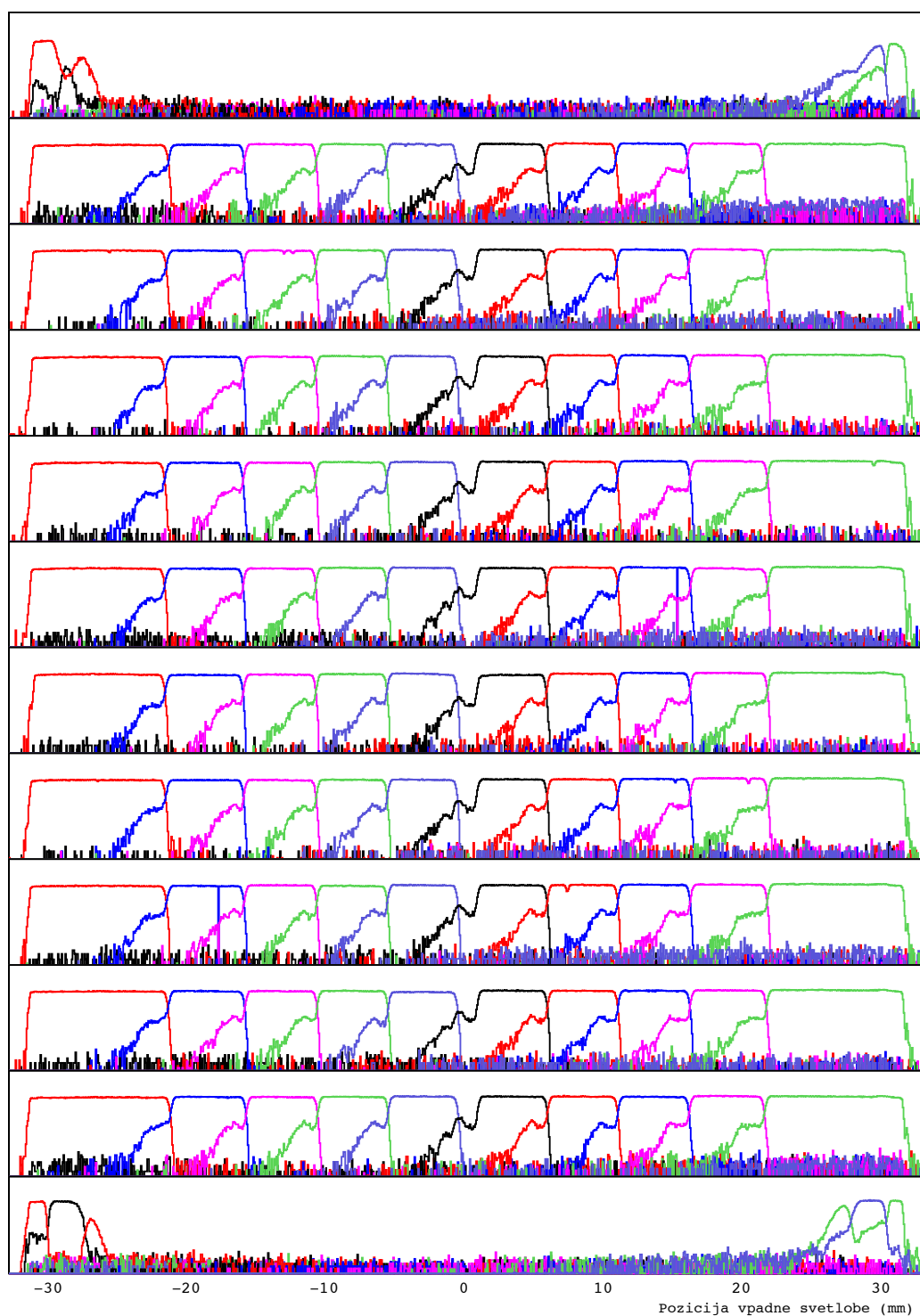
Celotna meritev pozicijske občutljivosti v smeri x, kjer so prikazane vse vrstice kanalov HAPD-ja, je prikazana na sliki 3.24. Zgornje in spodnje vrstice ne vidimo, ker fotoelektroni zaradi efekta nehomogenega električnega polja pristanejo na sosednji vrstici. Tega na grafih ne vidimo, saj je prikazan samo signal vrstice, v kateri smo merili pozicijsko občutljivost.



Slika 3.22: Pozicijska občutljivost desete vrstice in stolpca HAPD-ja ZJ5296 z (a) in brez (b) priključene visoke napetosti.



Slika 3.23: Slabo delovanje (a), nedelovanje (b) in šumenje (c) kanala. Prvi efekt je viden preko manjšega števila zabeleženih dogodkov na vseh pozicijah tretjega kanala iz leve (modra črta) na HAPD ZJ5574, drugi preko popolne odsotnosti signala iz sedmega kanala (manjkajoča črna črta) na HAPD ZJ5587 in tretji kot konstanten signal neodvisen pri vseh pozicijah (zelena črta) na HAPD ZJ5319. Iz leve polovice vrstice HAPD-ja ZJ5319 ni odziva, ker na čip APD ni bila priklopljena zaporna napetost.



Slika 3.24: Meritev pozicijske občutljivosti HAPD-ja, kjer vsaka vrstica na sliki predstavlja vrstico kanalov na HAPD-ju. Na osi  $y$  je za vsako vrstico logaritemska skala z minimalno vrednostjo 1 in maksimalno  $10^4$ .





---

## DELOVANJE SENZORJEV PRI OTEŽENIH POGOJIH

---

Z aparaturo za testiranje senzorskih modulov lahko poleg meritev iz poglavja 3 študiramo delovanje HAPD-jev v odvisnosti od zapornih napetosti in nastavitve čitalne elektronike (poglavje 2.4.7). S prvim lahko simuliramo slabše delovanje senzorjev zaradi sevalnih poškodb, z drugim pa optimiziramo njegovo delovanje.

### 4.1 SEVALNE POŠKODBE

Med pogoji pri izbiri fotonkega senzorja je bil ta, da mora delovati pod visoko sevalno obremenitvijo (poglavje 2.3.2); senzorji morajo v 10 letni življenjski dobi eksperimenta preživeti fluenco približno  $10^{12}$  nevtronov na kvadratni centimeter in dozo do 1000 Gy zaradi sevanja  $\gamma$ . To pomeni, da se bodo njihove lastnosti s časom spreminjale, kar se bo najbolj poznalo na količini šuma. Šum detektorja je posledica toka skozi p-n stik in ima več virov [19]. Prvi vir je gibanje manjšinskih nosilcev naboja (vrzeli na strani  $n$  in elektroni na strani  $p$ ), ki lahko zaradi difuzije preidejo v osiromašeno področje, kjer jih nato močno električno polje privede na drugo stran. Ta prispevek imenujemo difuzijski tok in je reda velikosti približno  $nA/cm^2$ . Drugi prispevek, imenovan generacijski tok, je posledica termične generacije parov v osiromašenem delu in znaša do nekaj  $\mu A/cm^2$ . Termična generacija je v veliki meri posledica nepravilnosti v kristalni mreži. Zadnji prispevek je tok po površini detektorja, ki je lahko posledica mehanskih poškodb in nečistoč na detektorski površini in je največji od vseh treh. Kljub temu, da ta prispevek ne gre skozi pomnoževalno področje opazno prispeva k šumu [20].

Pri staranju je najbolj na udaru generacijski tok, saj nevtroni povzročijo defekte na kristalni mreži in tako povečajo število mest, ki omogočajo termično generacijo. Zaradi tega lahko velikost šuma naraste do takšne mere, da se enofotonski vrhovi v porazdelitvi po višini sunkov nahajajo znotraj šuma. To pomeni, da zaradi premajhnega razmerja med signalom in šumom ne moremo učinkovito zaznavati posameznih fotonov.

## 4.2 OPTIMIZACIJA DELOVANJA

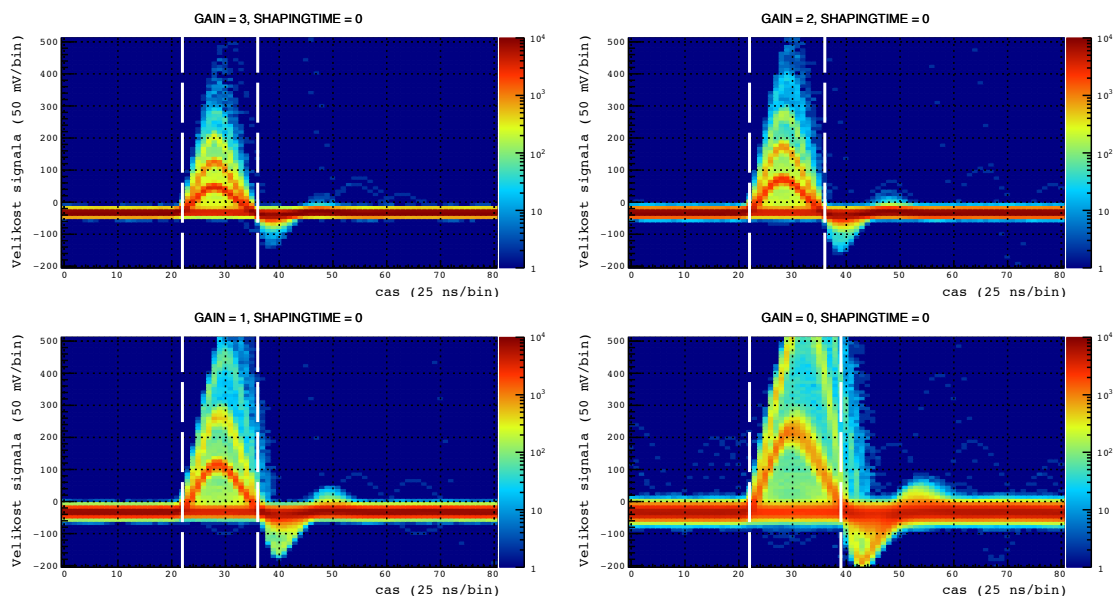
Delovanje senzorja lahko spreminjamo z nastavitvami parametrov GAIN in SHAPINGTIME (poglavje 2.4.7 in tabela 2.2). S prvim nastavljam ojačanje nabožno občutljivega ojačevalnika, z drugim pa določamo karakteristični čas, ki ga potrebuje potrebuje signal, da zraste iz 10 % na 90 % velikosti vrha. V tem poglavju so predstavljeni samo rezultati meritev kontrolnega analognega signala. S standardno nastavitvijo elektronike smo izmerili časovno odvisnost velikosti signala po centrih kanalov pri vseh kombinacijah parametrov GAIN in SHAPINGTIME.

Odzivi HAPD na spreminjanje parametrov GAIN (od najmanjšega 3 do največjega 0) in SHAPINGTIME (od najmanjšega 0 do največjega 3) so prikazani na sliki 4.1 in 4.2. Vidimo, da so razlike pri parametrih GAIN od 3 do 1 samo v višini odziva signala, pri vrednosti 0 (največji) pa se malo podaljša tudi dolžina signala. Pri spreminjanju parametra SHAPINGTIME se pa močno spreminja dolžina signala in le malo njegova višina.

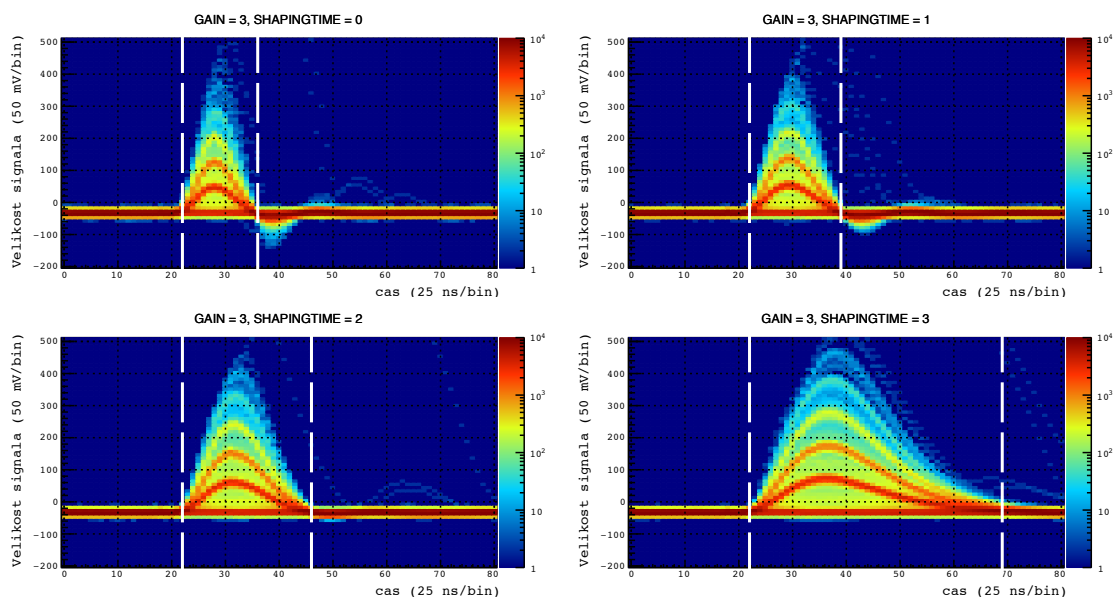
S spreminjanjem parametra GAIN vplivamo na ojačanje signala, kar vidimo na sliki 4.3, kjer je prikazana porazdelitev ojačanja kanalov v odvisnosti od parametra GAIN. Vidimo, da poleg ojačanja s tem parametrom narašča tudi njegova razmazanost. Odvisnosti srednjih vrednosti ojačanja  $G_a$  in pripadajočih razmazanosti  $\sigma_a$  v odvisnosti od parametra GAIN za vse parametre SHAPINGTIME so predstavljene na sliki 4.4 (zgoraj in sredina). Na sliki 4.4 spodaj je narisana relativna razmazanost  $\sigma_a/G_a$ , iz katere vidimo, da je nesmiselno uporabljati maksimalni nastavitvi parametrov GAIN in SHAPINGTIME hkrati, saj se to odraža s slabšim razmerjem  $\sigma_a/G_a$ . Iz istega razloga je nesmiselno uporabljati minimalen GAIN in visok SHAPINGTIME (3, 2). Zanimivo bi bilo natančneje preveriti delovanje pri parametru SHAPINGTIME 1, saj pri vseh nastavitvah kaže vsaj enako dobro delovanje kot nastavitev 0.

Moderni detektorji se pogosto zanašajo na elektroniko z nizkim šumom, ki uporablja metodo oblikovanja signala za optimiziranje razmerja med signalom in šumom pri vhodnem signalu [15]. Zaradi večanja šuma tekom obratovanja Belle II bi bilo učinkovito zaznavanje pri dolgih karakterističnih časih nemogoče. Zato smo v naših meritvah že od začetka uporabljali najkrajšega (SHAPINGTIME 0).

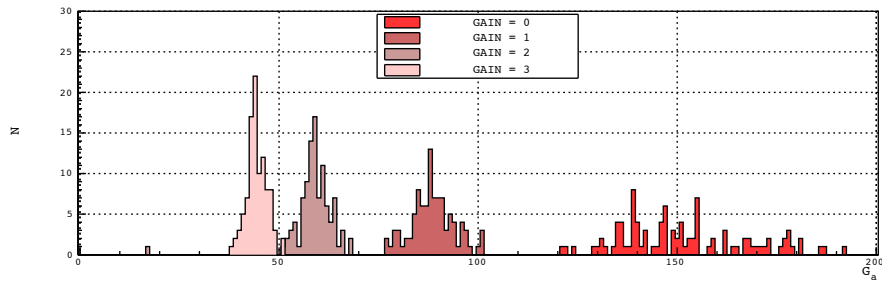
Pomembna lastnost je razmerje med signalom in šumom. Na sliki 4.5 je prikazana odvisnost srednje vrednosti porazdelitve signal/šum vseh kanalov od parametra GAIN za vse parametre SHAPINGTIME. Za signal smo izbrali ojačanje  $G_a$ , za šum pa standardno deviacijo vrha šuma. Tudi tukaj vidimo, da je nesmiselno uporabljati maksimalna parametra GAIN in SHAPINGTIME hkrati, najboljši rezultat pa dobimo za najmanjšo vrednost parametra SHAPINGTIME.



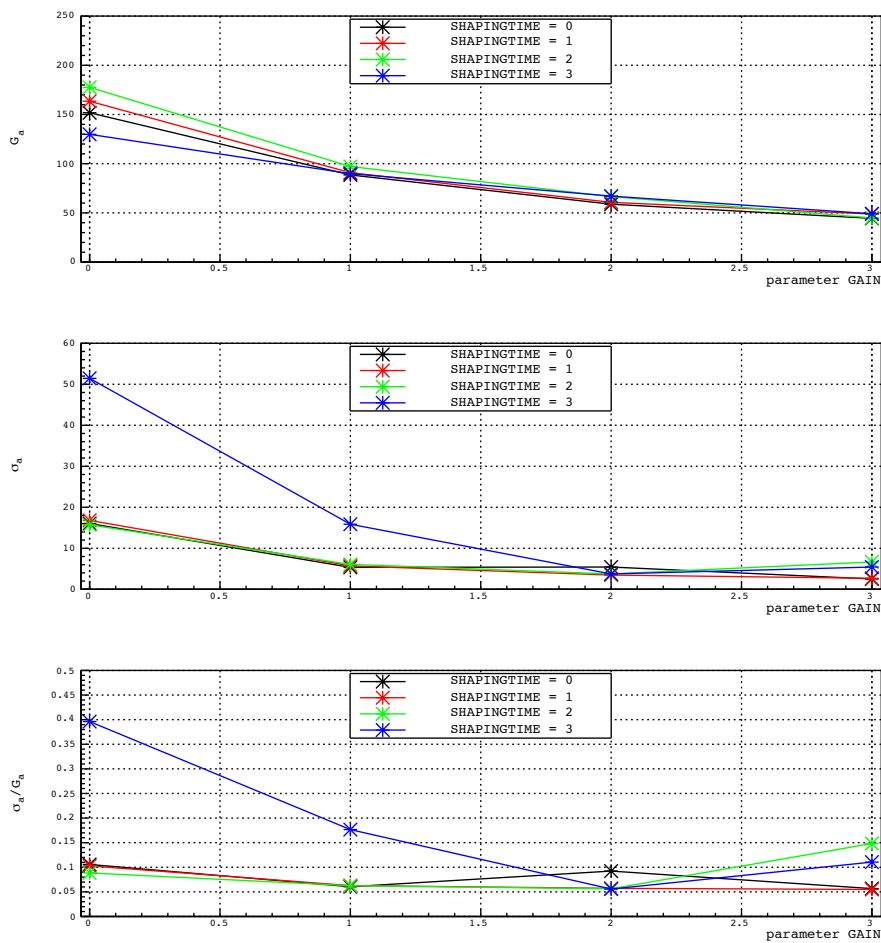
Slika 4.1: Časovna odvisnost velikosti signala iz sensorja za štiri različne nastavitve parametra GAIN pri najmanjši nastavitvi parametra SHAPINGTIME. Z belimi črtami sta vrisana začetek in konec signala.



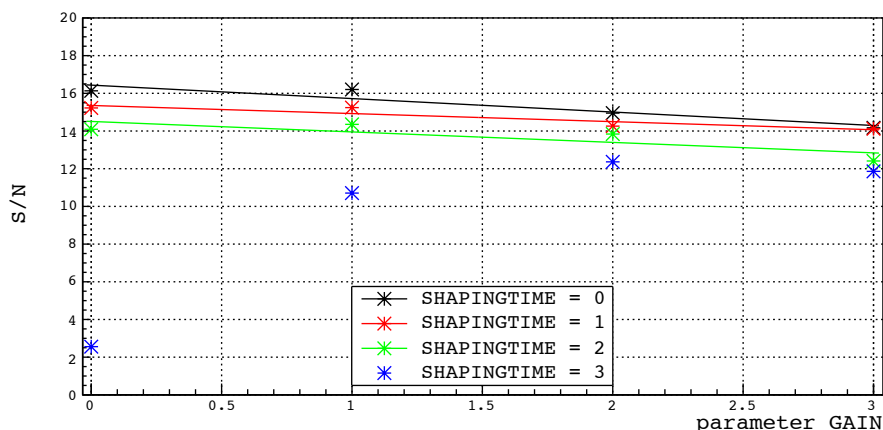
Slika 4.2: Časovna odvisnost velikosti signala iz sensorja za štiri različne nastavitve parametra SHAPINGTIME pri najmanjši nastavitvi parametra GAIN. Z belimi črtami sta vrisana začetek in konec signala.



Slika 4.3: Porazdelitev ojačanja kanalov senzorja v odvisnosti od parametra GAIN pri parametru SHAPINGTIME 0.



Slika 4.4: Srednje vrednosti ojačanja  $G_a$  (zgoraj), njihove razmazanosti  $\sigma_a$  (sredina) in relativne razmazanosti  $\sigma_a/G_a$  (spodaj) v odvisnosti od parametra GAIN za vse 4 parametre SHAPINGTIME. Barvne črte so dodane izključno za lažjo razpoznavnost merskih točk.

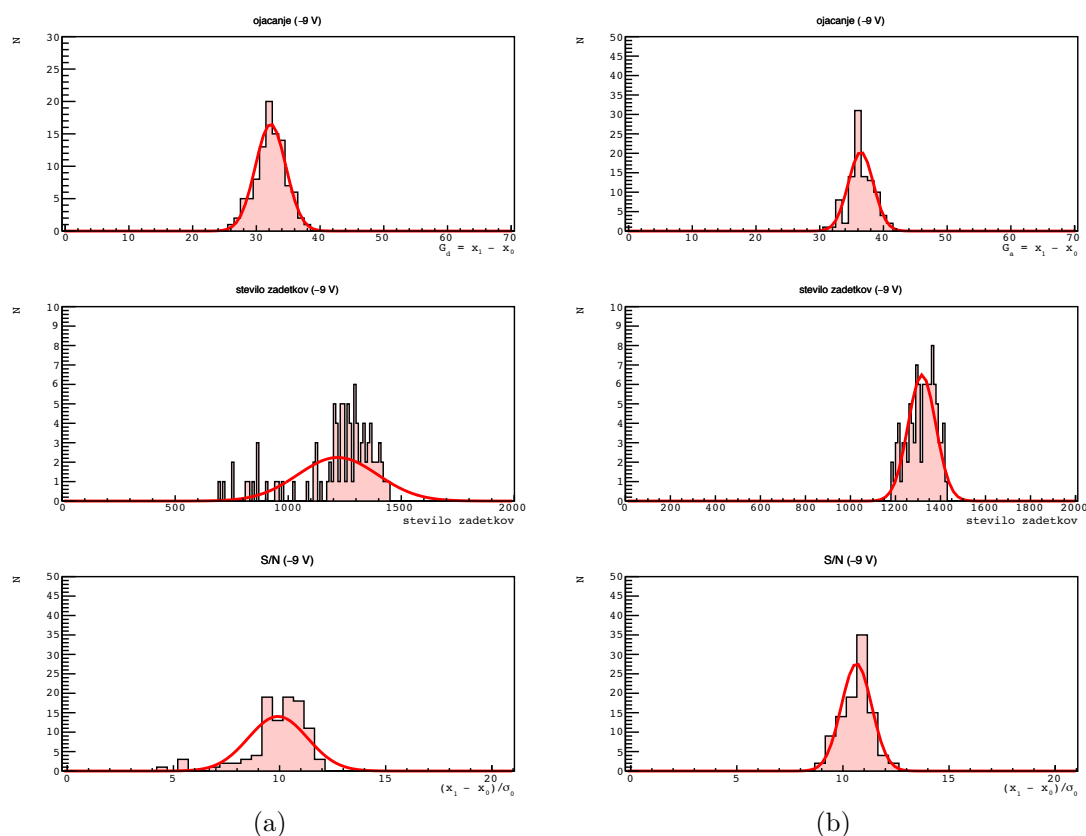


Slika 4.5: Razmerje med signalom in šumom v odvisnosti od parametra GAIN pri vseh parametrih SHAPINGTIME.

Delovanje lahko optimiziramo tudi tako, da zvišamo visoko napetost na fotokatodi. V našem primeru smo testirali pri visoki napetosti 7 kV, ki jo lahko zvišamo do 8.5 kV. To se pozna v približno 25 % višjem ojačanju (slika 2.15a).

Delovanje senzorjev se bo zaradi sevalnih poškodb med delovanjem eksperimenta poslabšalo zaradi povečanja šuma. Kompenzacija z dvigom zaporne napetosti nad največjo dovoljeno ni mogoča. Efektivno bo odziv pri največji napetosti čez nekaj časa podoben odzivu pri nižji zaporni napetosti danes. Zato smo opazovali odziv HAPD z meritvijo števila digitalnih sunkov v odvisnosti od praga diskriminacije (poglavje 3.3) in meritvijo časovne odvisnosti velikosti analognega signala (poglavje 3.4) pri različnih vrednostih zaporne napetosti. Na rezultate meritev smo prilagodili modelske funkcije in nato pri vseh napetostih za vse kanale narisali porazdelitev ojačanja, števila zadetkov ter razmerja signal/šum. Slika 4.6 prikazuje primer porazdelitev pri razliki med zaporno in nominalno napetostjo  $-9$  V.

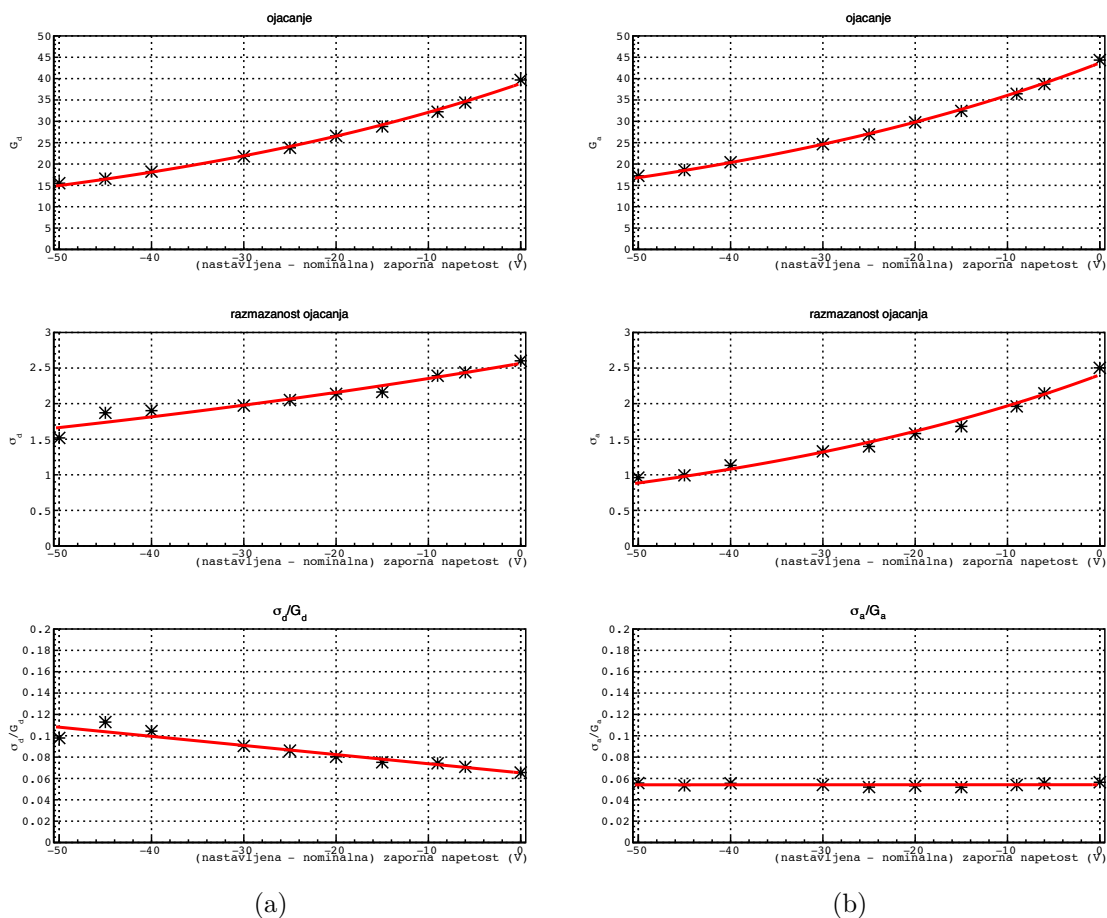
Srednja vrednost ojačanja v odvisnosti od zaporne napetosti je prikazana na sliki 4.7 (zgoraj) in kot pričakovano eksponentno pada z nižanjem zaporne napetosti. Tudi razmazanost ojačanja, slika 4.7 (sredina), pada z nižanjem zaporne napetosti, saj so razlike med kanali, ki so priklopljeni na skupno zaporno napetost, vedno manj izrazite. Pri obeh primerjavah sta rezultata iz digitalnega in kontrolnega analognega signala zelo podobna. Ojačanje digitalnega signala proti kontrolnemu analognemu je nekoliko manjše in njegova razmazanost je nekoliko večja. Večja razmazanost je posledica razlik v nivojih šuma posameznih elektronskih kanalov in v nepopolni izenačitvi njihovih srednjih vrednosti  $\mu$  tudi po umeritvi. Skupaj se to izrazi, da relativna razmazanost  $\sigma/G$ , slika 4.7 (spodaj), pri digitalnem signalu z nižanjem napetosti narašča, medtem ko pri kontrolnem analognem signalu ostaja konstantno.



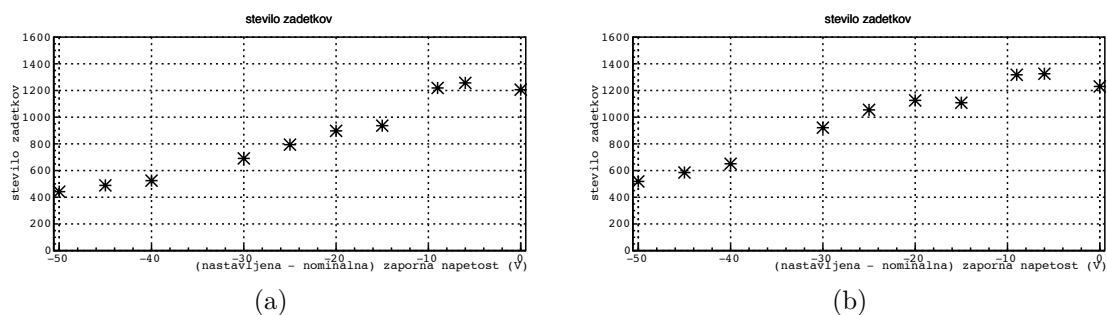
Slika 4.6: Porazdelitev ojačanja (zgoraj), števila zadetkov (sredina) in razmerja signal/šum (spodaj) iz digitalnega (a) in kontrolnega analognega (b) signala pri razliki med zaporno in nominalno napetostjo  $-9\text{ V}$  za HAPD ZJ5296.

Za izračun izkoristka zaznavanja smo pri digitalnem signalu mejo nastavili na prag diskriminacije 570 in pri njem prešteli število prehodov, pri kontrolnem analognem pa smo v porazdelitvi ADC določili mejo, ki ustreza pragu diskriminacije in sešteli število dogodkov v vseh kanalih histograma nad pragom. Prikaz izkoristka v odvisnosti od zaporne napetosti se nahaja na sliki 4.8. Vidimo, da z znižanjem zaporne napetosti za  $50\text{ V}$  izkoristek za zaznavanje posameznih fotonov pade tudi za faktor 3.

Razmerje med signalom in šumom v odvisnosti od zaporne napetosti je prikazano na sliki 4.9. Začnemo pri razmerju približno 12, nakar z nižanjem napetosti pridemo do razmerja približno 4. Podobno se bo zgodilo tekom delovanja Belle II, le da bo poleg ojačanja naraščal tudi šum. Z razmerjem med signalom in šumom okrog 3 ne moremo več detektirati posameznih fotonov, saj se njihovi signali skrijejo v šumu. 99.7% šuma se nahaja znotraj intervala  $\pm 3\sigma_0$ , to pomeni, da nad pragom diskriminacije z znatno verjetnostjo signale sproža šum. V primeru, da bo prišlo do

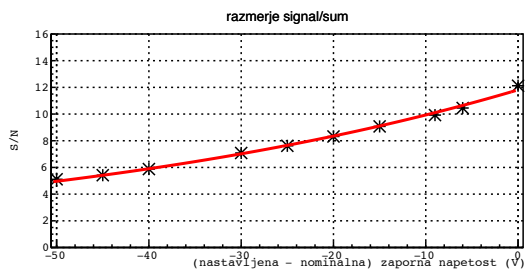


Slika 4.7: Rezultati odvisnosti ojačanja  $G$ , razmazanosti  $\sigma$  in relativne razmazanosti  $\sigma/G$  v odvisnosti od razlike med zaporno in nominalno napetostjo za digitalni (a) in kontrolni analogni (b) signal za HAPD s serijsko številko ZJ5296.

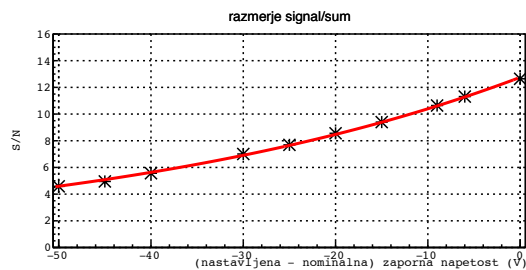


Slika 4.8: Število sunkov v odvisnosti od razlike med zaporno in nominalno napetostjo za digitalni (a) in kontrolni analogni (b) signal za HAPD s serijsko številko ZJ5296.

takšnega padca v razmerju signal/šum, bo potrebna menjava fotoniskih detektorjev.



(a)



(b)

Slika 4.9: Razmerje med signalom in šumom v odvisnosti od razlike med zaporno in nominalno napetostjo za digitalni (a) in kontrolni analogni (b) signal za HAPD s serijsko številko ZJ5296.



---

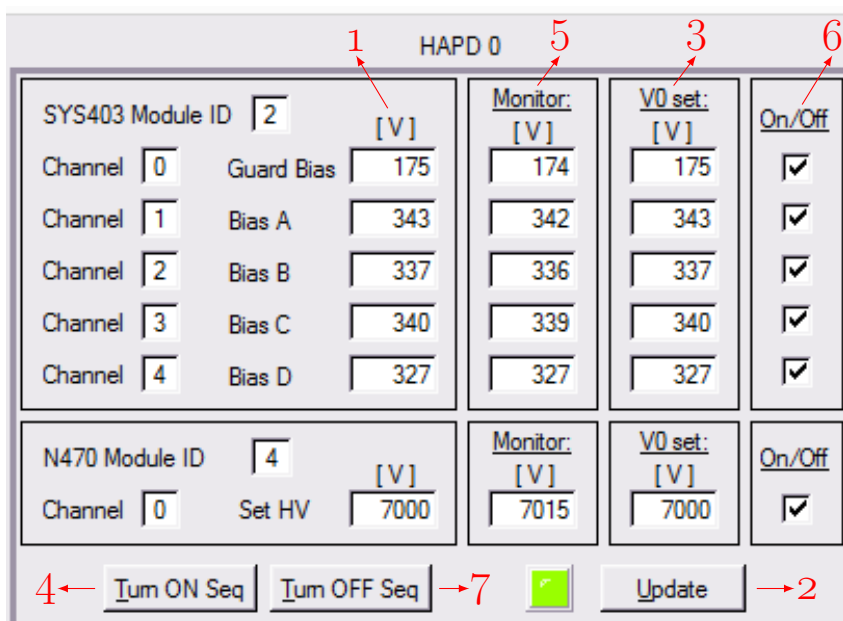
## IZVEDBA MERITEV Z APARATURO

---

Pred vgradnjo bo potrebno preveriti lastnosti vseh 420 senzorskih modulov, ki bodo vgrajeni v končni detektor. Na vsakem od njih bodo izvedene vse meritve, opisane v poglavju 3. Ker vsaka od meritev lastnosti traja nekaj ur, je avtomatizacija nujna. V tem poglavju je predstavljen protokol meritev od priklopa senzorja do prikaza rezultatov.

Protokol meritve je sledeč:

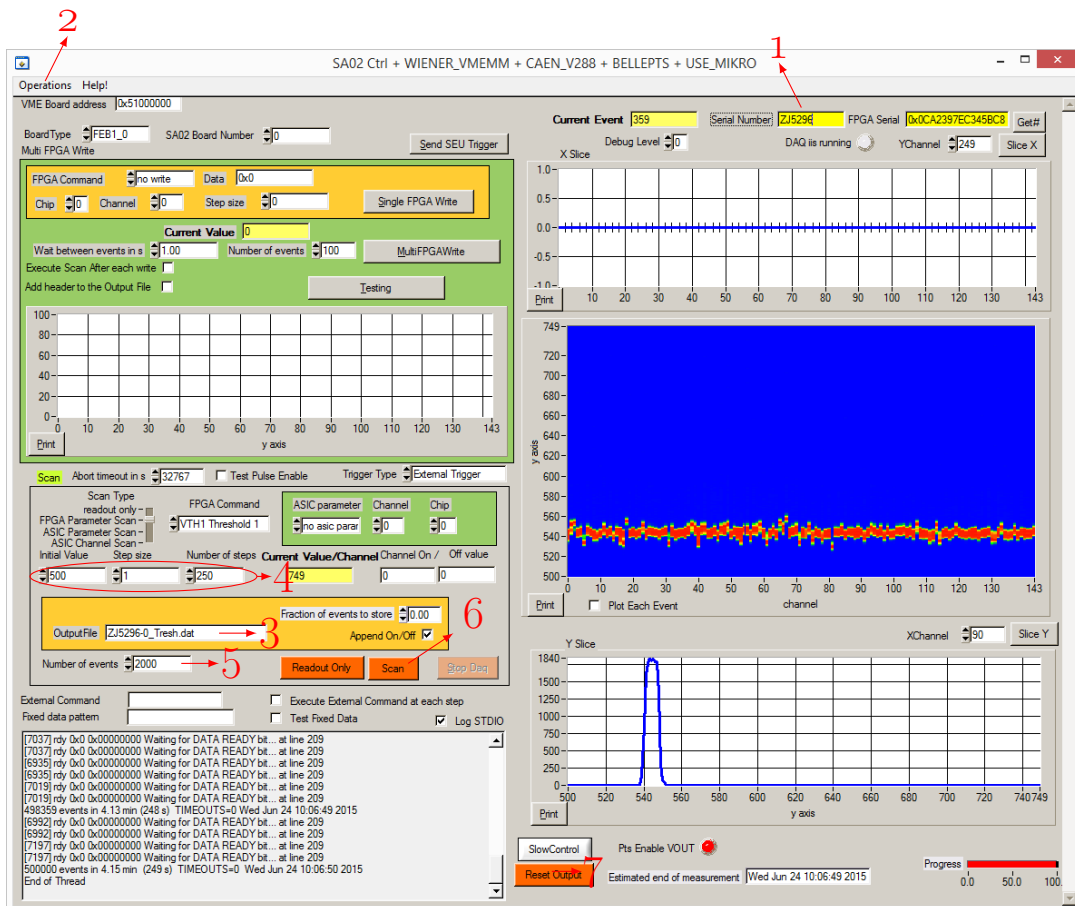
- A. Na podnožje čitalne elektronike vstavi ter pritrdi HAPD in preveri kontakte. Zapri pokrov merilne škatle in ga pritrdi ter pokrij s prekrivalom.
- B. Vklopi napajanje elektronike na TEXIO PW18-1.8AQ. Napetosti (tokovi) morajo v primeru enega HAPD-ja znašati 3.8 V (210 mA), -2.1 V (-360 mA) in 2.1 V (330 mA), v primeru štirih pa tokovi linearno narastejo.
- C. S programom *HAPD\_napetosti* (slika 5.1) na HAPD priklopiš napetosti. V stolpec pod številko 1 vpiši napetosti, pri katerih želiš preveriti delovanje HAPD-ja in nato pritisni Update (ob številki 2). Napetosti, ki si jih zapisal v stolpec 1, se morejo sedaj pojaviti še v stolpcu 3. To pomeni, da so se zapisale v registre napajalnih modulov CAEN SY403 in CAEN N470. S pritiskom na Turn ON Seq (ob številki 4) poženeš zaporedje za vzpostavitev napetosti. Najprej se bo v stolpcu 6 pojavila kljukica v vrstici Guard Bias in nato bo v isti vrstici začela naraščati napetost v stolpcu 5 do nastavljene napetosti v stolpcu 3. Nato se bo postopek ponovil za vseh preostalih pet napetosti. S kljukicami v stolpcu 6 lahko vklopimo/izklopimo posamezne kanale. S pritiskom na gumb Turn OFF Seq (ob številki 7) poženeš zaporedje za izključitev napetosti.
- D. Sedaj poženi program *SAO2\_daq* (slika 5.2) in takoj vpiši serijsko številko modula HAPD, ki mu boš meril lastnosti.
- E. V oknu *SAO2\_daq* klikni meni Operations (številka 2) in izberi Configuration, ki ti odpre okno *SAO2 Configuration* (slika 5.3). Klikni Browse (številka 1) in izberi datoteko s privzetimi vrednostmi, imenovano `Default.param`, jo naloži



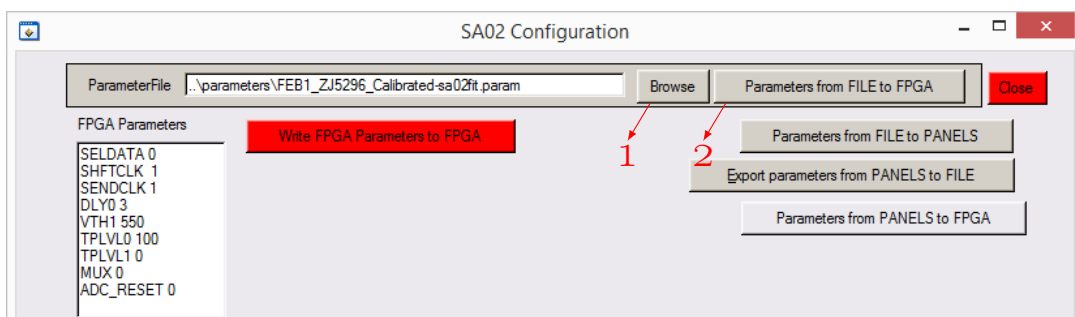
Slika 5.1: Program HAPD\_napetosti. Za razlago glej seznam pod točko C.

ter klikni Parameters from FILE to FPGA. S tem na čitalno elektroniko naložiš privzete vrednosti. Sedaj lahko zapreš okno *SAO2 Configuration*.

- F. Sedaj boš izmeril srednje vrednosti elektronskih kanalov s priklopljenim HAPD-jem brez osvetlitve (prepričaj se, da je laser izklopljen). V oknu *SAO2\_daq* pri številki 3 vpiši ime izhodne datoteke v Output File, na primer *serijska\_pred-umeritvijo.dat*, pri številki 4 izpolni Initial Value (začetna vrednost), Step size (korak) in Number of steps (število korakov) s 400, 1 in 200 in pri številki 5 nastavi Number of events (število dogodkov) na 2000. Pri številki 6 klikni Scan, da poženeš meritev, ki pri teh nastavitvah traja približno 200 s (1 s/korak).
- G. Izhodno datoteko sedaj v terminalu z ukazom
- ```
./sa02read -i <vhodna datoteka> -o <izhodna datoteka>
```
- pretvorimo v datoteko *root*, ki jo nato uporabimo za umeritev v okolju *ROOT*.
- H. V terminalu se premakni v mapo *obdelava/calibration*, znotraj katere morata biti *sa02fit.cxx* in *Default.param*. Sem kopiraj datoteko *serijska\_pred-umeritvijo.root*, poženi *root* z ukazom *root -l <izhodna datoteka>* in vtipkaj *.x sa02fit.cxx*. V mapi se pojavi datoteka *serijska\_pred-umeritvijo.param*, v kateri so izračunani zamiki srednjih vrednosti elektronskih kanalov.
- I. Ponovi postopek, opisan pod točko E, le da sedaj naložiš datoteko *serijska\_pred-umeritvijo.param*.

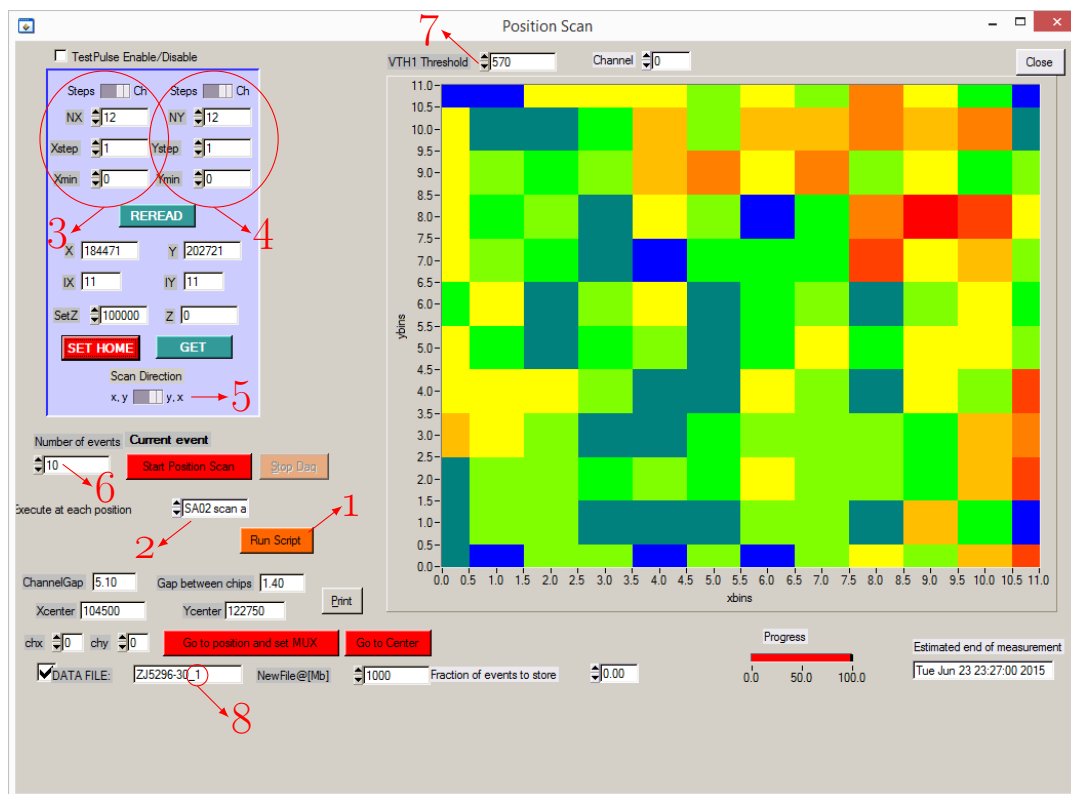


Slika 5.2: Program SA02\_daq. Za razlago glej seznam pod točkama D in F.



Slika 5.3: Program SA02\_daq okno Calibration. Za razlago glej seznam pod točko E.

- J. Vključi okno laserja in nastavi atenuator na nevtralni filter z atenuacijo 99.7%.
- K. V *SAO2\_daq* pritisni na Operations in izberi 2D Scan. Vse nadaljnje meritve boš izvajal v tem oknu (slika 5.4). Klikni na Run Script (številka 1) in izberi datoteko 1.txt, ki se nahaja v mapi scripts.



Slika 5.4: Program *SAO2\_daq* okno *Position Scan*. Za razlago glej seznam pod točko K.

Razlaga ukazov, ki jih lahko uporabljaš v skripti:

- KalibracijaMizice – izvede kalibracijo dvodimenzionalne premične mizice
- SetCtrlVal par1 par2 – se uporablja za nastavitve vrednosti v programu *SAO2\_daq* in potrebuje še dva vhodna parametra par1 in par2. par1 pove, katero vrednost boš nastvil na vrednost par2. Za par1 imaš na voljo:
  - P1\_DATA; v oknu *SAO2\_daq* nastavi Initial Value (začetno vrednost), na sliki 5.2 označeno s 4
  - P1\_DSTEP; v oknu *SAO2\_daq* nastavi Step size (korak), na sliki 5.2 označeno s 4
  - P1\_NEVE; v oknu *SAO2\_daq* nastavi Number of steps (število korakov), na sliki 5.2 označeno s 4

- P1\_TOREAD; v oknu *SAO2\_daq* nastavi Number of events (število dogodkov), na sliki 5.2 označeno s 5
  - P2\_DAQEXE; v oknu *Position Scan* nastavlja polje Execute at each position (izvedi v vsaki točki), na sliki 5.4 označeno z 2
  - P4\_NEVE; v oknu *CAEN\_V729* nastavlja polje NEVE (število dogodkov), na sliki 5.5 označeno z 1
- c) 2D par1 ... par4 par5 ... par9 par10 par11 par12, ki v oknu *Position Scan* nastavi vrednosti in izvede meritev pozicijske občutljivosti.
- par1 do par4 nastavijo skeniranje po kanalih (Ch) oziroma korakih (Steps) in vrednosti NX (število korakov), Xstep (velikost koraka v smeri  $x$ ) ter Xmin (začetna vrednost v smeri  $x$ ), na sliki 5.4 označeno z 3
  - par5 do par8 nastavijo iste stvari kot prejšnji štirje parametri, le za smer  $y$ , kar je na sliki 5.4 označeno s 4
  - par9 z vrednostjo 0 oziroma 1 nastavi zaporedje smeri scana (ali prvo v smeri  $x$  in nato  $y$ , ali obratno), na sliki 5.4 označeno s 5
  - par10 nastavi *Number of events* (število dogodkov), na sliki 5.4 označen s 6
  - par11 nastavi *VTH1 Threshold* (merilni prag diskriminacije), na sliki 5.4 označen s 7
  - par12 nastavi pripono imenu meritve, na sliki 5.4 označeno z 8

Skripta bo sedaj izvedla sledeče zaporedje:

- a) kalibracija dvodimenzionalne premične mizice
- b) meritev števila sunkov v odvisnosti od praga diskriminacije ter meritev časovne odvisnosti velikosti signala po središčih kanalov z ukazi

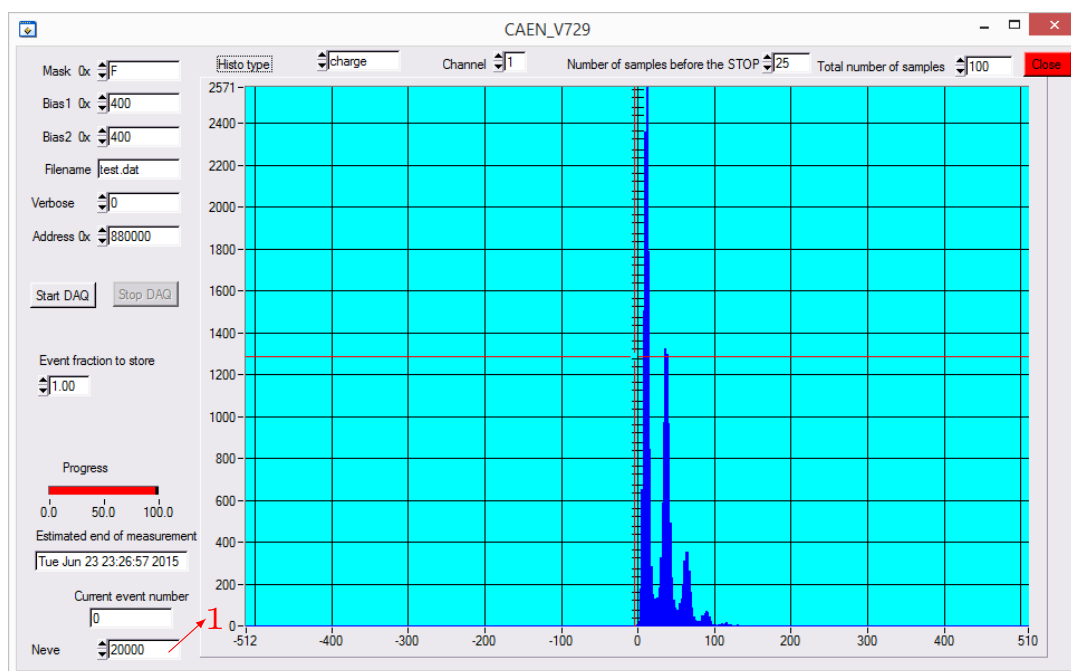
```
SetCtrlVal P1_DATA 500
SetCtrlVal P1_DSTEP 1
SetCtrlVal P1_NEVE 250
SetCtrlVal P1_TOREAD 2000
SetCtrlVal P2_DAQEXE 3
SetCtrlVal P4_NEVE 20000
2D 1 12 1 0 1 12 1 0 1 10 570 1
```

- c) in meritev pozicijske občutljivosti v obeh smereh z ukazi

```
SetCtrlVal P2_DAQEXE 0
2D 0 1000 188 10000 1 12 1 0 1 2000 570 2
2D 1 12 1 0 0 1000 188 28000 0 2000 570 3
```

Časovna zahtevnost teh meritev je skupaj 24 h in jo lahko prepolovimo, če pri vseh ukazih prepolovimo število dogodkov. Še dodatno lahko prepolovimo čase meritev pozicijske občutljivosti, če prepolovimo število korakov in podvojimo velikost koraka (mesta `par2` in `par3`, ter `par6` in `par7`). Po meritvi dobimo tri datoteke `<serijska>_[n]_file01.dat`, kjer `[n]` pomeni:

```
1 <- meritev stevila sunkov v odvisnosti od praga
    diskriminacije in meritev casovne odvisnosti velikosti
    signala
2 <- pozicijska občutljivost v smeri x
3 <- pozicijska občutljivost v smeri y
```



Slika 5.5: Program `SA02_daq` okno `CAEN_v729`. Za razlago glej seznam pod točko `K`.

- L. Po končanih meritvah moraš izklopiti visoko napetost in odstraniti atenuacijo laserskega žarka ter pognati skripto `NoHV.txt`, ki ponovno izvede meritve pozicijske občutljivosti v obeh smereh. Časovno zahtevnost te meritve zmanjšaš enako kot pri prejšnji točki. Kot rezultat dobiš dve datoteki, kjer `[n]` pomeni

```
4 <- NoHV pozicijska občutljivost v smeri x
5 <- NoHV pozicijska občutljivost v smeri y
```

- M. Datoteke je potrebno pretvoriti iz formata `dat` v `root`, kar ponovno narediš v terminalu, tako da poženeš `./batch1.sh`, v kateri moraš serijsko številko nastaviti na serijsko številko merjenega HAPD-ja.

N. Sedaj v terminalu poženi ukaz `root -x 'script.c("<serijska>")'` in dobiš pripravljene rezultate v `data/<serijska>/<serijska>.pdf`.

Poročilo za enega od senzorjev je priloženo v dodatku [A](#).





---

## ZAKLJUČEK

---

Detektor obročev Čerenkova z dvema plastema sevalca iz aerogela v fokusirni postavitvi bo vgrajen v spektrometer Belle II. Nahajal se bo v odprtini med osrednjo potovalno komoro in elektromagnetnim kalorimetrom na strani, v katero se bo gibalo težišče razpadnih produktov, in bo prvenstveno ločeval med pioni ter kaoni v območju gibalnih količin od 1 GeV/c do 4 GeV/c. Pred vgradnjo bo potrebno preveriti lastnosti njegovih komponent: sevalcev iz aerogela, senzorskih modulov HAPD in čitalne elektronike.

Za magistrsko delo sem na *Institutu »Jožef Stefan«* sodeloval pri izgradnji merilne aparature, s katero bodo preverili lastnosti in delovanje vseh 420 senzorskih modulov HAPD. Poskrbel sem za enakomerno delitev laserskega žarka v štiri ločena vlakna, primerno postavitve dvodimenzionalne premične mizice za osvetljevanje štirih senzorjev hkrati in pravilen priklop napetosti ter povezavo z računalnikom. Na računalniški strani sem dopisal programsko opremo za nadzor ter izvedbo meritev in napisal skripte, ki v programskem okolju ROOT obdelajo meritve ter jih predstavijo v elektronskem dokumentu PDF. Standardne meritve, ki jih bodo z aparaturo izvedli na vseh senzorjih so: umeritev elektronike, meritev števila sunkov v odvisnosti od praga diskriminacije, meritev časovnega odvisnosti velikosti signala in meritev pozicijske občutljivosti z in brez priključene visoke napetosti. Časovna zahtevnost meritev je močno pogojena z željeno kvaliteto rezultatov. Pri zadovoljivi kvaliteti trajaja izvedba vseh meritev približno 8 h.

Odziv detektorjev se bo tekom trajanja eksperimenta Belle II zaradi sevalnih poškodb spreminjal. Zato sem izvedel in analiziral meritve pri različnih nastavitvah čitalne elektronike, s katerimi se lahko optimizira delovanje senzorjev. Pokazal sem, da je najboljše razmerje med signalom in šumom pri najmanjšem ojačanju nabojno občutljivega ojačevalnika in najkrajši časovni konstanti oblikovalca. Isto velja tudi za relativno razmazanost  $\sigma/G$ .



Del III

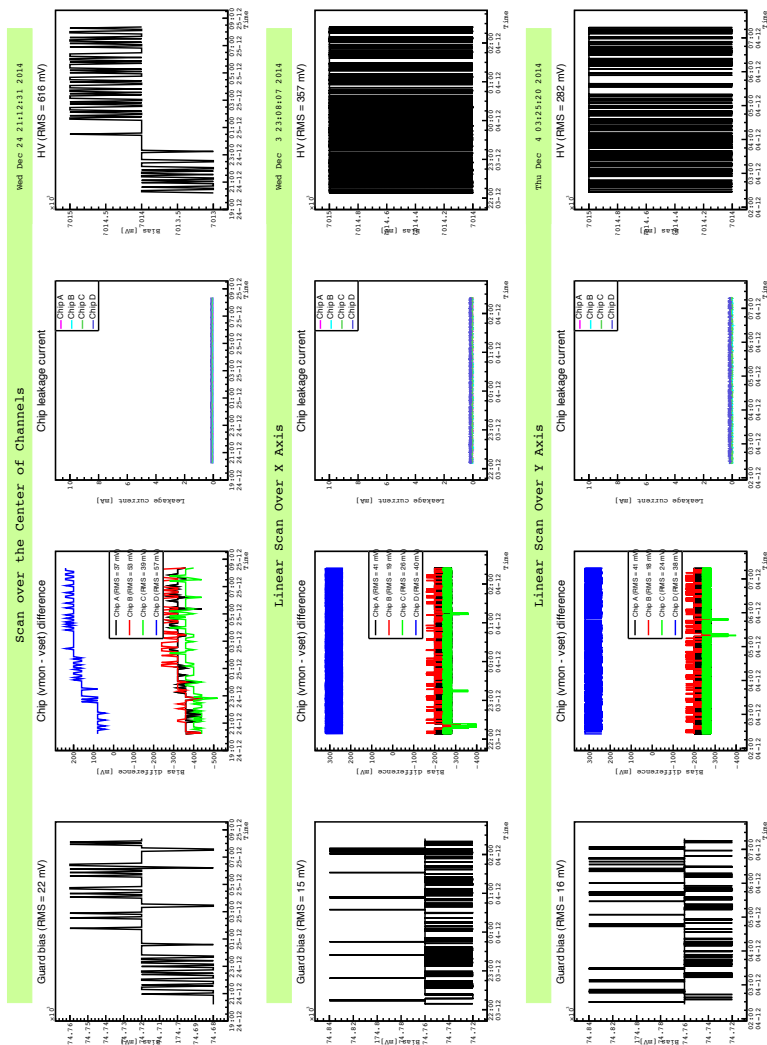
DODATEK



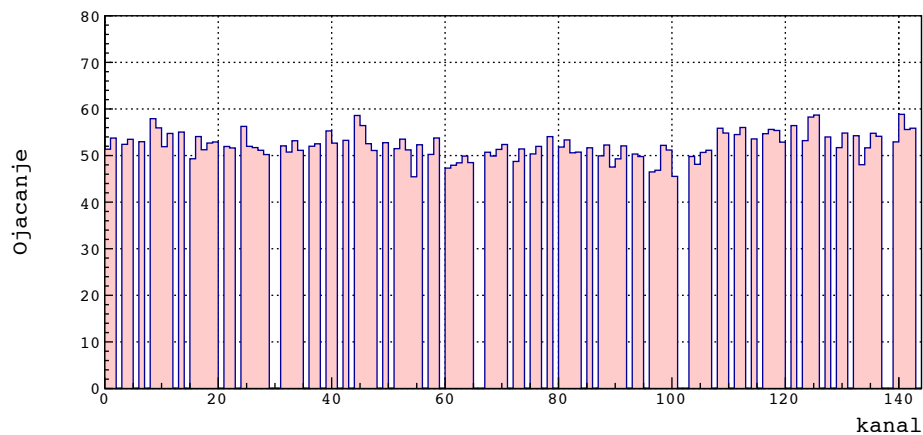
## POROČILO ZA HAPD ZJ5296

ZJ5296

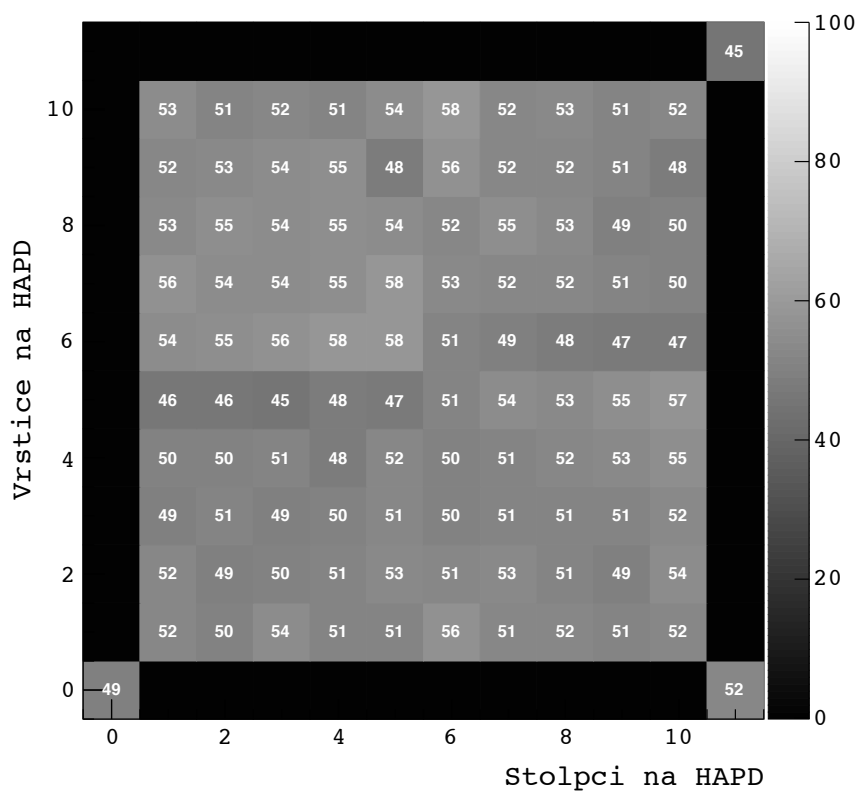
Wed Dec 24 21:12:31 2014



Slika A.1: Prikaz nihanja priklopljenih napetosti in tokov med standardnimi meritvami. Vidimo, da so napetosti večinoma stabilne.

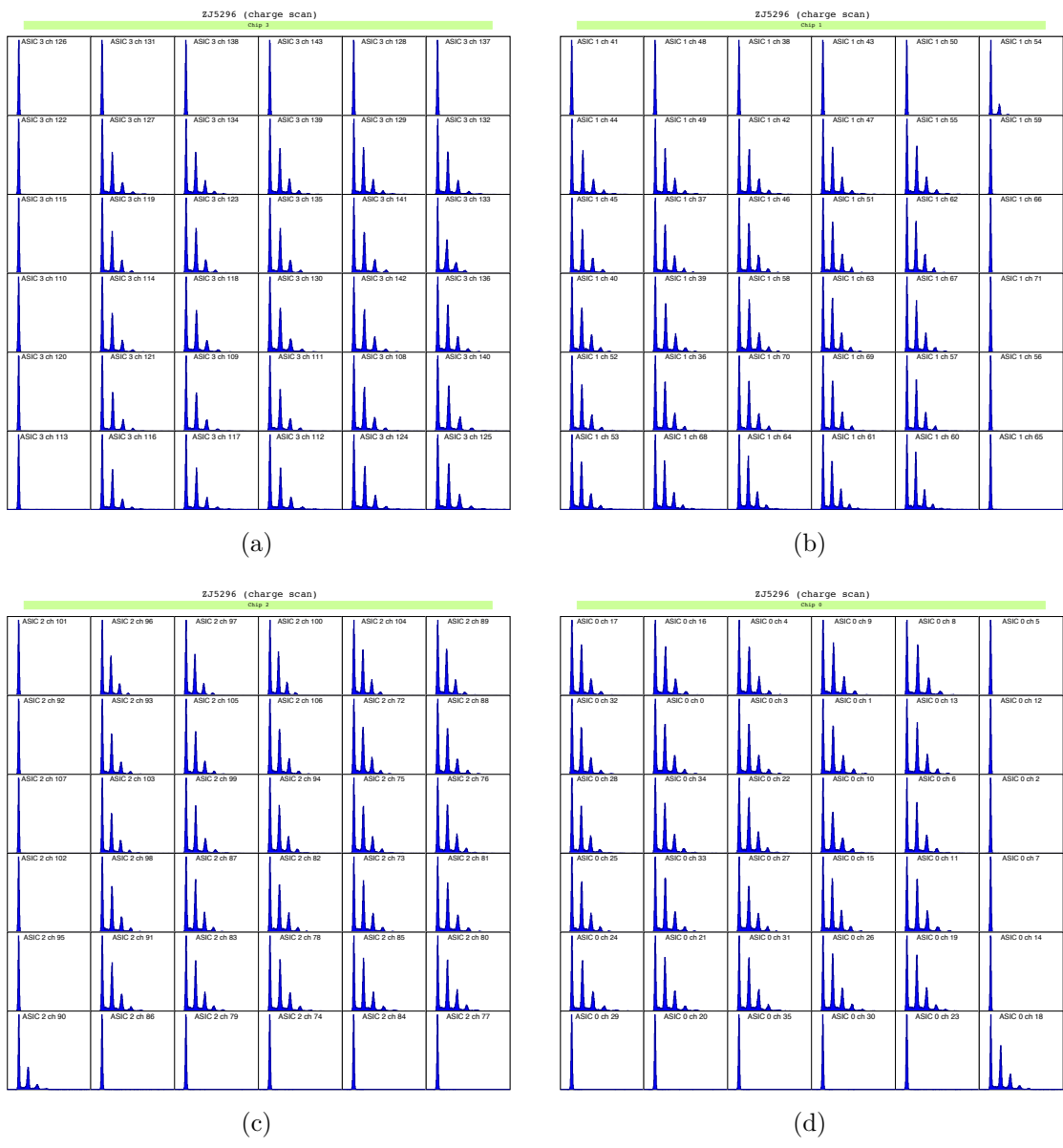


(a)

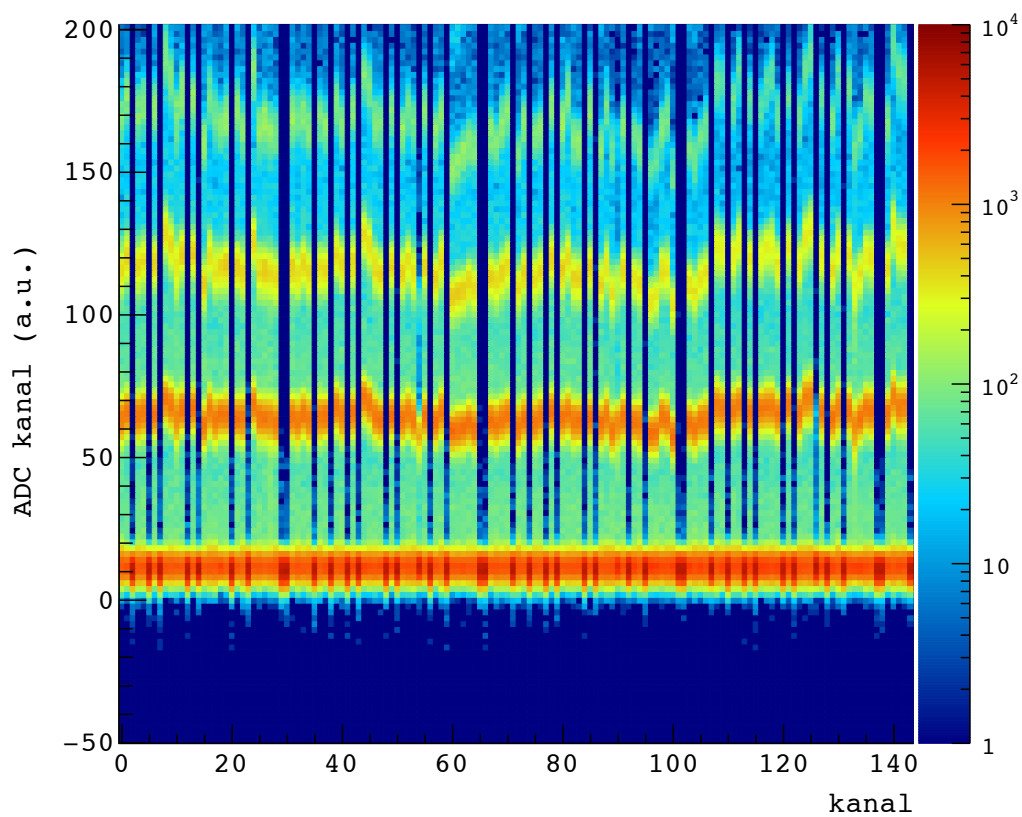


(b)

Slika A.2: Eno in dvo dimenzionalen prikaz ojačanja kontrolnega analognega signala za vseh 144 kanalov.

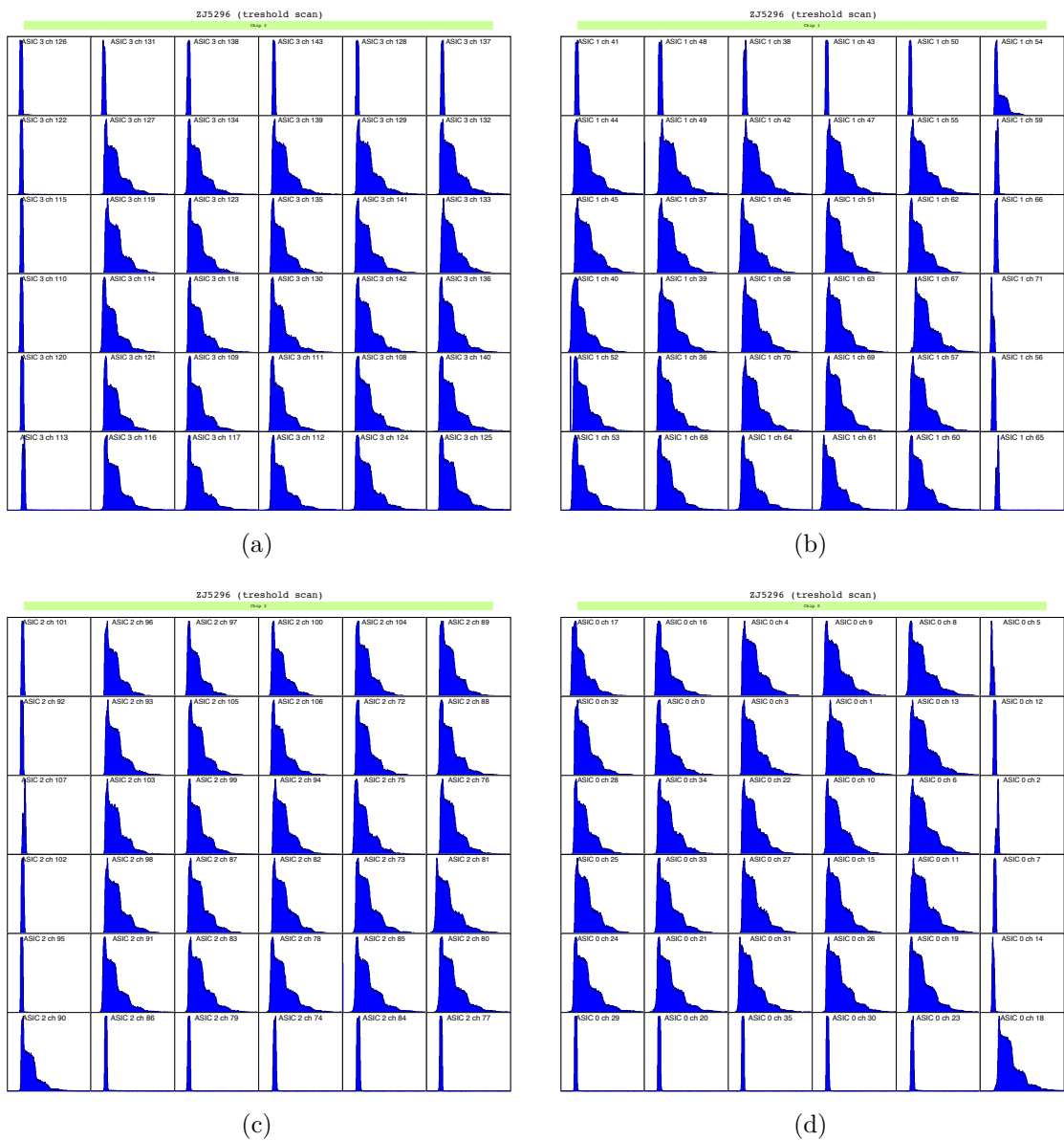


Slika A.3: Porazdelitev po naboju za vsak kanal posebej.

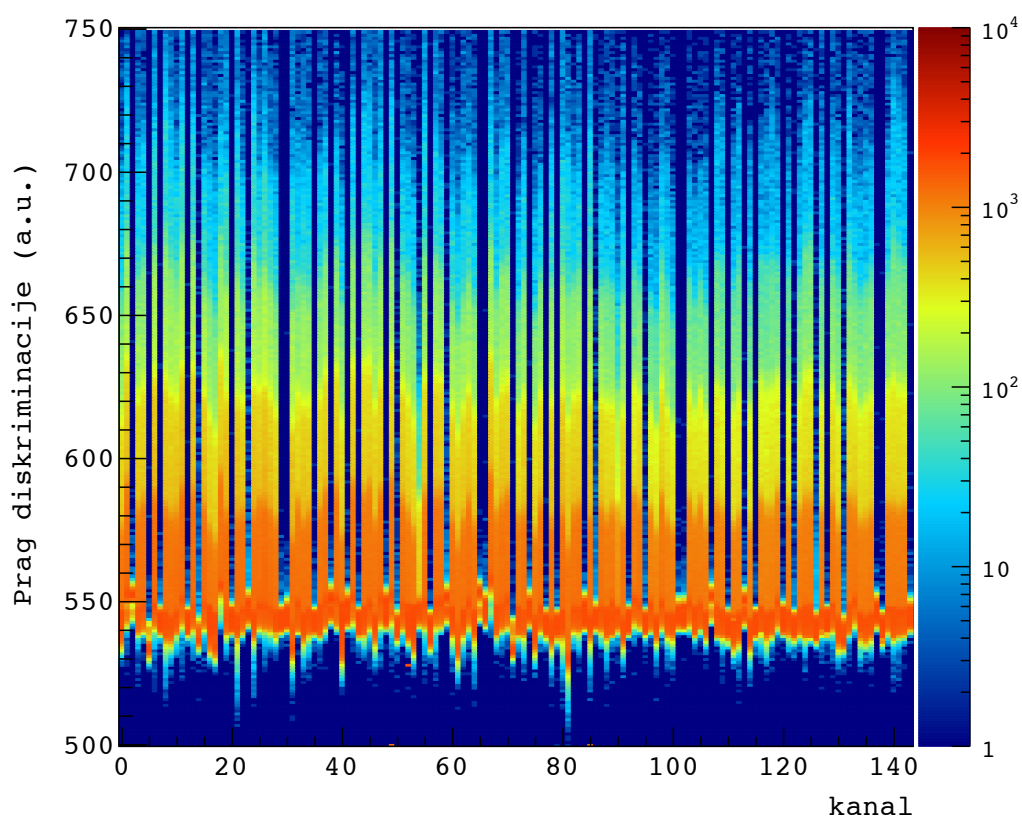


Slika A.4: Porazdelitev po naboju za izračun časovnih potekov analognih signalov za vse kanale senzorja.



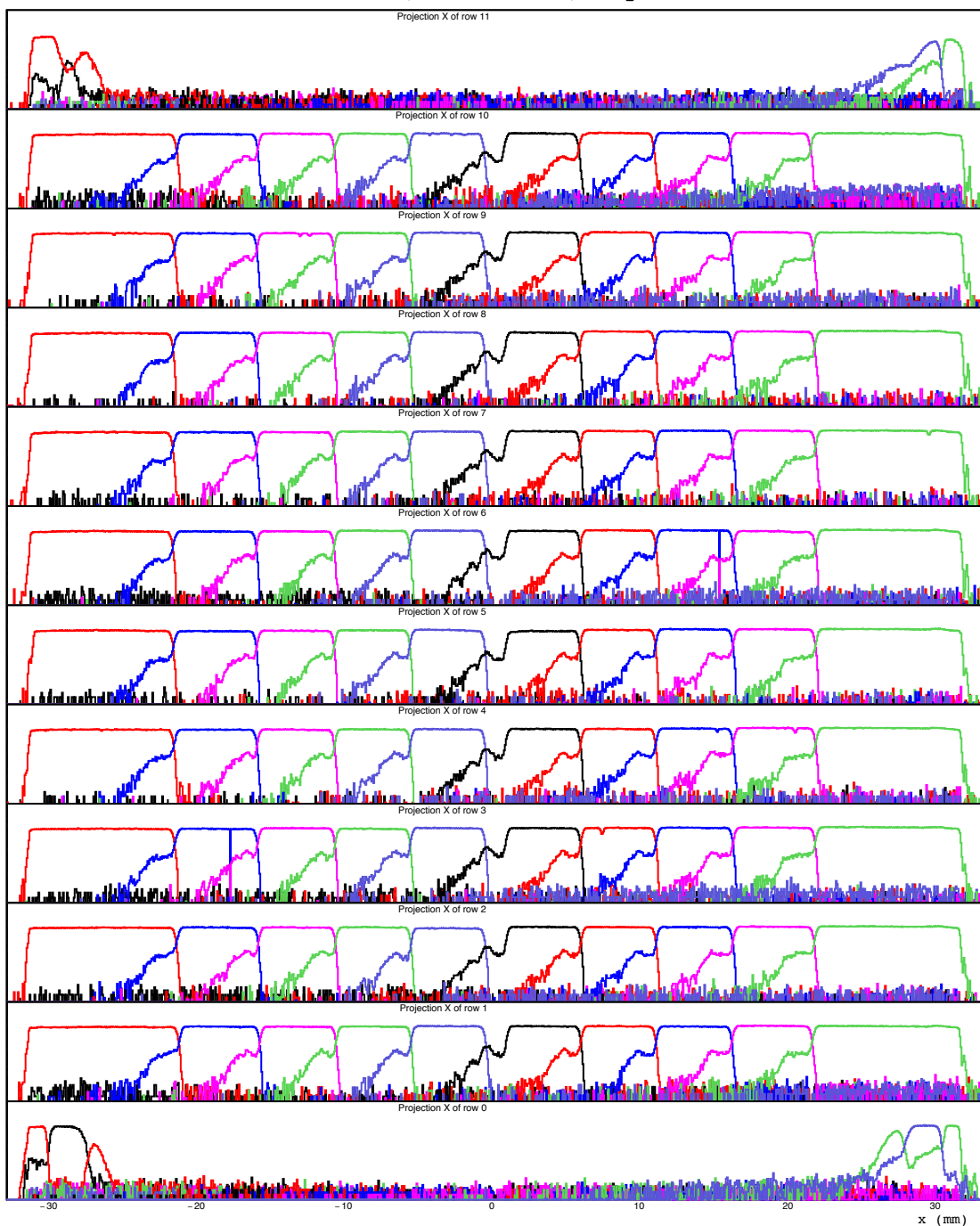


Slika A.5: Število sunkov v odvisnosti od praga diskriminacije za vsak kanal posebej.

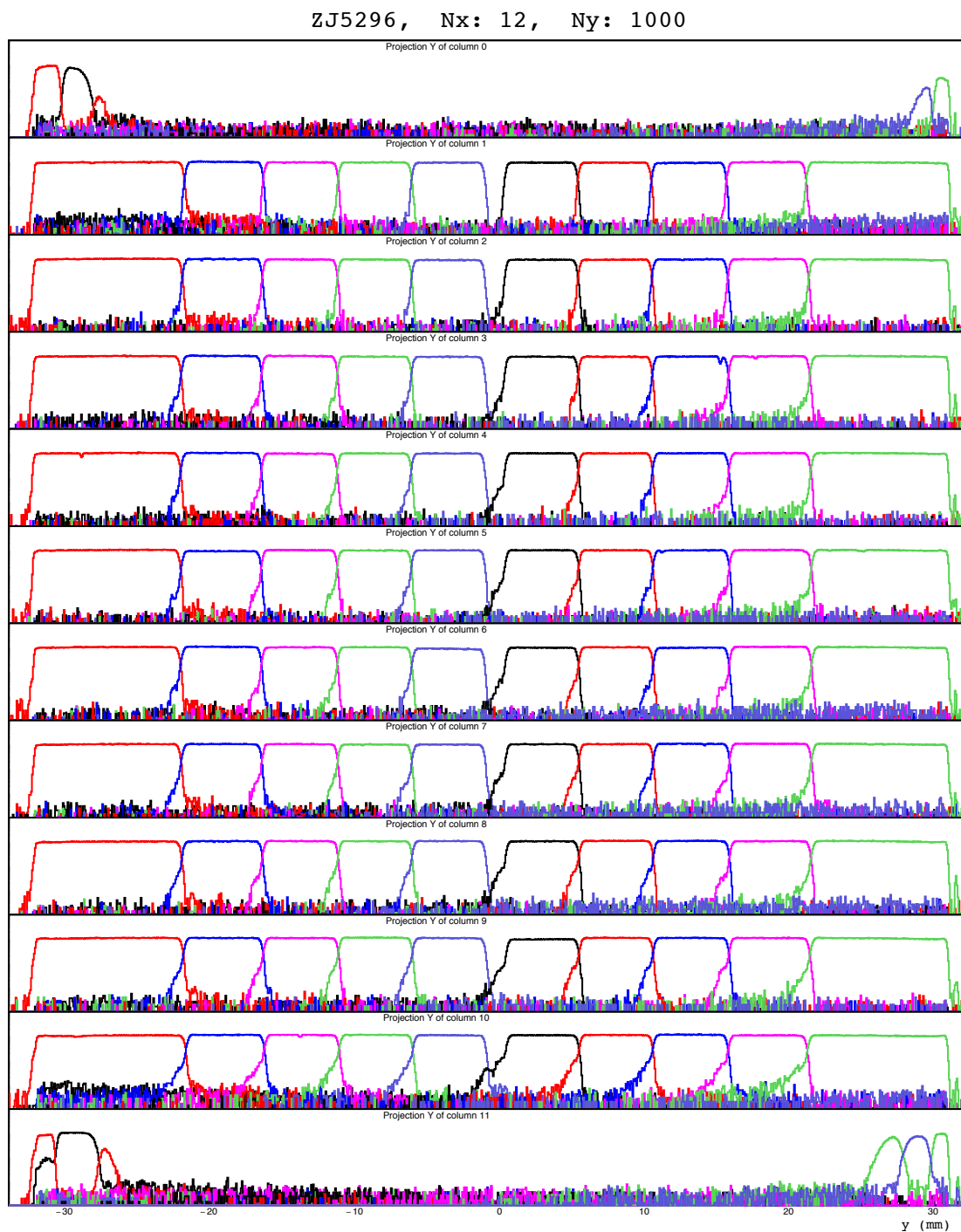


Slika A.6: Število sunkov v odvisnosti od praga diskriminacije za vse kanale senzorja.

ZJ5296, Nx: 1000, Ny: 12

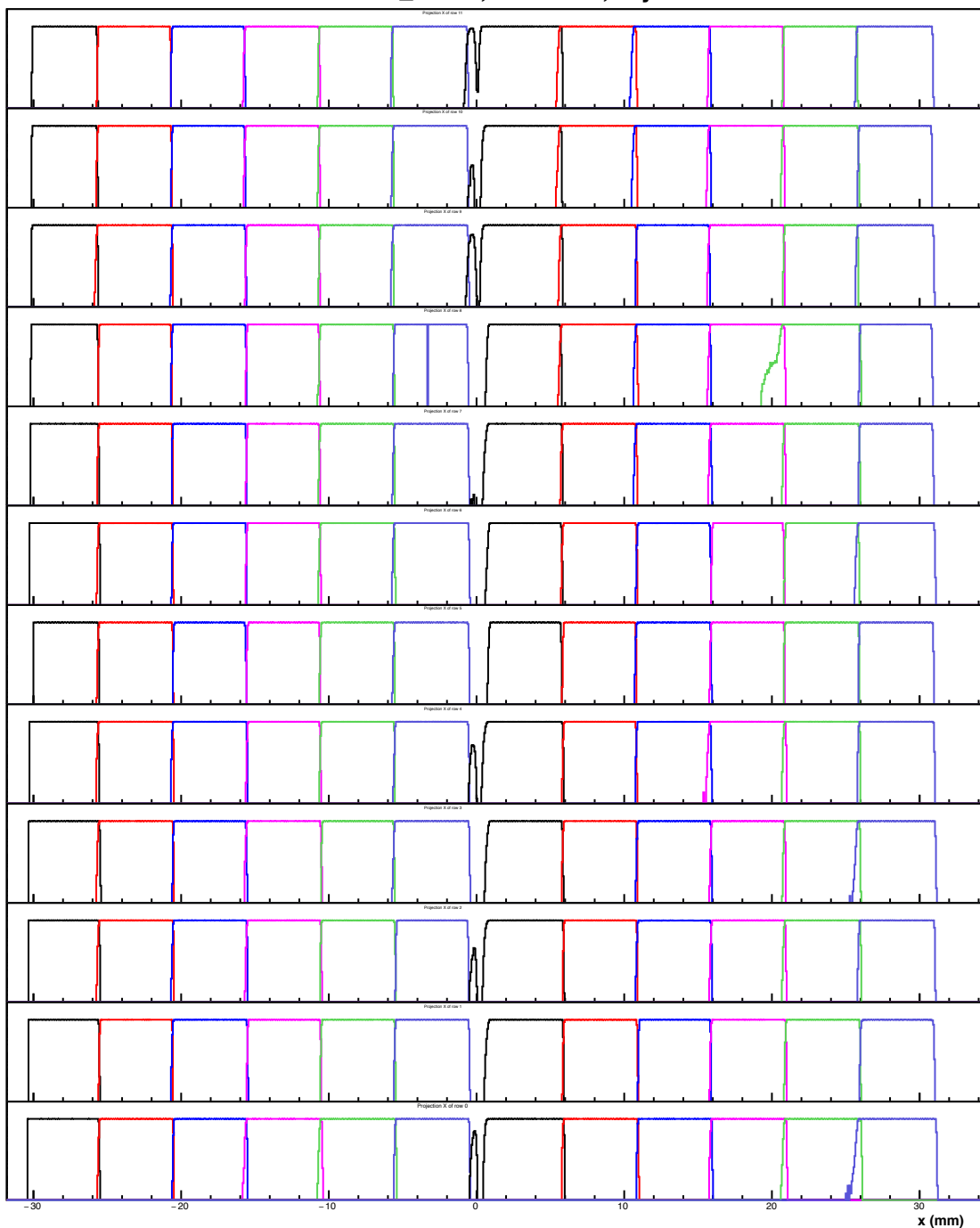


Slika A.7: Pozicijska občutljivost senzorja po centrih vrstic z priključeno visoko napetostjo.

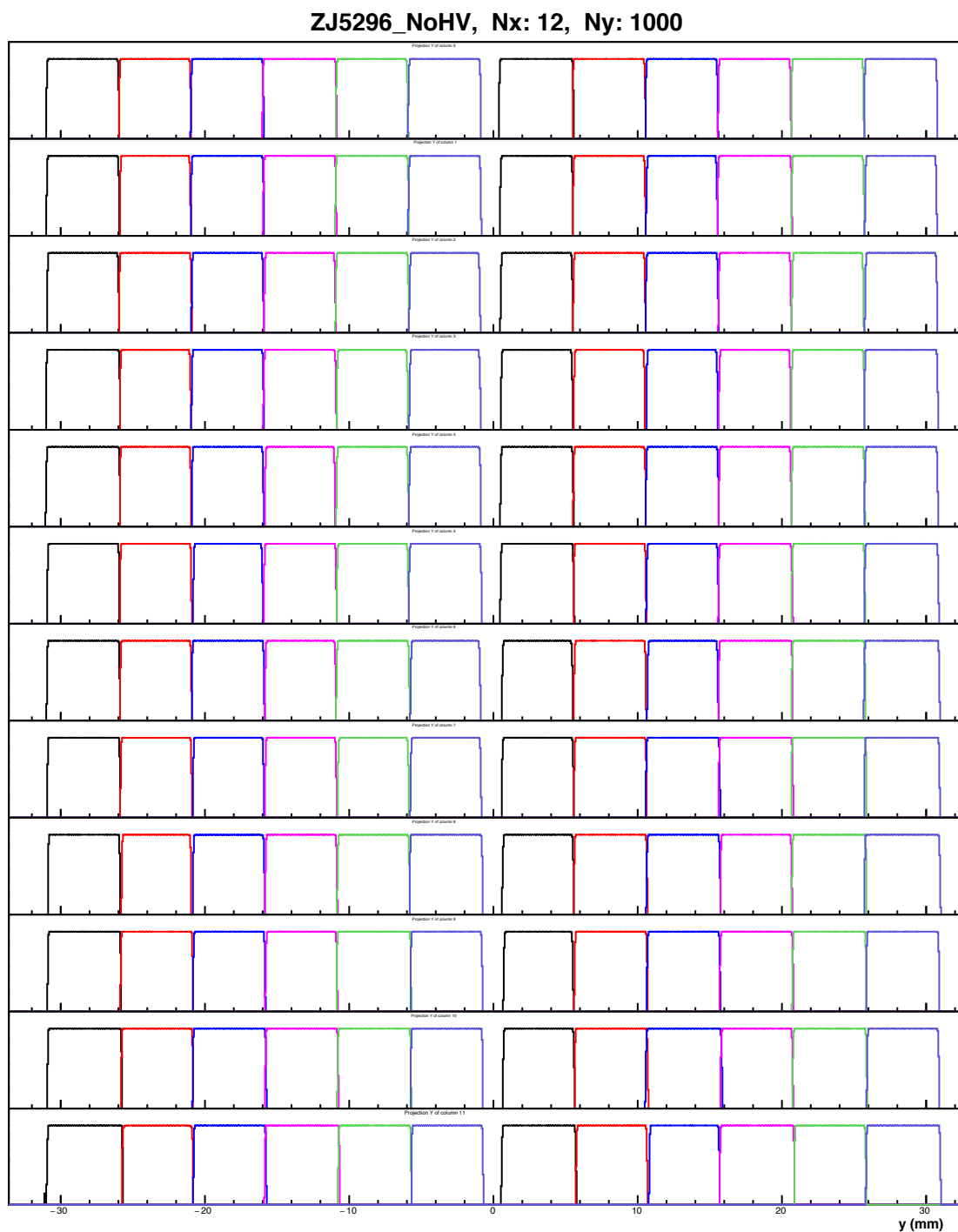


Slika A.8: Pozicijska občutljivost sensorja po centrih stolpcev z priključeno visoko napetostjo.

ZJ5296\_NoHV, Nx: 1000, Ny: 12



Slika A.9: Pozicijska občutljivost senzorja po centrih vrstic brez priključene visoke napetosti.



Slika A.10: Pozicijska občutljivost sensorja po centrih stolpcev brez priključene visoke napetosti.

---

## VIRI IN LITERATURA

---

- [1] T. Abe, et al. Belle II Technical Design Report. *arXiv preprint arXiv:1011.0352*, 2010.
- [2] S. Hashimoto, et al. Letter of Intent for KEK Super B Factory. Technical report, KEK, 2004.
- [3] R. Dolenc. *Time-of-Flight Positron Emission Tomography Using Cherenkov Radiation*. PhD thesis, Fakulteta za matematiko in fiziko, Ljubljana, Slovenija, oktober 2012.
- [4] J. V. Jelley. *Br. J. of Appl. Phys.*, 6(7):227, 1955.
- [5] E. Nappi. *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)*, 61(3):270 – 276, 1998.
- [6] A. T. Young. Rayleigh scattering. *Appl. Opt.*, 20(4):533–535, Feb 1981.
- [7] Hamamatsu Photonics K. K. Editorial Committee. *PHOTOMULTIPLIER TUBES, Basics and Applications*. Hamamatsu Photonics K. K. Electron Tube Division, 3rd edition, februar 2006.
- [8] R. Pestotnik, et al. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.*, 732(0):371 – 374, 2013.
- [9] P. Križan in S. Korpar. *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.*, 63(1):329–349, 2013.
- [10] Hamamatsu Photonics K. K. Multi-Pixel Photon Counter – MPPC – Product catalogue No. KAPD0002E02, julij 2007.
- [11] Hamamatsu Photonics K. K. Photomultiplier Tube Series – UBA and SBA, Product catalogue No. TPMH1305E02, marec 2008. [http://shpat.com/docs/hamamatsu/UBA\\_SBA\\_TPMH1305E02.pdf](http://shpat.com/docs/hamamatsu/UBA_SBA_TPMH1305E02.pdf). [www; dostopno 18. 5. 2015].
- [12] I. Adachi, et al. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.*, 639(1):103 – 106, 2011.
- [13] L. Šantelj. Trajectories of electrons in HAPD, October 2008. Zasebna komunikacija.
- [14] A. Seljak, et al. *J. Instrum.*, 6(01):C01083, 2011.
- [15] A. Seljak. *Proximity focusing RICH with aerogel radiator*. PhD thesis, Fakulteta za matematiko in fiziko, Ljubljana, Slovenija, december 2013.

- [16] Wikipedia. VMEbus — Wikipedia, The Free Encyclopedia, 2015. <https://en.wikipedia.org/wiki/VMEbus>. [www; dostopno 26. 6. 2015].
- [17] Ortec. Electronics Standards and Definitions. <http://www.ortec-online.com/download/Electronics-Standards-Definitions.pdf>. [www; dostopno 26. 6. 2015].
- [18] O. Nepomuk. *eConf*, C0604032:0018, 2006.
- [19] W. R. Leo. *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments: A How-to Approach*. Springer, 1994.
- [20] Hamamatsu Photonics K. K. Opto-semiconductor handbook. [http://www.hamamatsu.com/eu/en/hamamatsu/overview/bsd/solid\\_state\\_division/related\\_documents.html](http://www.hamamatsu.com/eu/en/hamamatsu/overview/bsd/solid_state_division/related_documents.html). [www; dostopno 29. 6. 2015].