

MUonE eksperiment: Identifikacija miona

Živković, Magdalena

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka / Sveučilište u Rijeci**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:194:645876>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-23**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Physics - PHYRI Repository](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI
FAKULTET ZA FIZIKU

Magdalena Živković

MUONE EKSPERIMENT: IDENTIFIKACIJA MIONA

Završni rad

Rijeka, 2024.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
FAKULTET ZA FIZIKU**

**PRIJEDIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ FIZIKA
SMJER FIZIKA**

Magdalena Živković

MUONE EKSPERIMENT: IDENTIFIKACIJA MIONA

Završni rad

Mentor: prof. dr. sc. Marin Karuza

Rijeka, 2024.

MUonE eksperiment: Identifikacija miona

Sažetak

Unutar okvira MUonE projekta razvoja novog detektora za muone u CERNu, pronađena je potreba za novom vrstom detektora zbog starosti i gubitka tehničke ekspertize u održavanju i proizvodnji trenutačnih eksperimentalnih postava. Predložen je i napravljen prototip detektora muona na bazi scintilatorskih vlakana i Silicone Photo Multiplier (SiPM) fotoosjetljivih detektora. SiPMovi su se sastojali od rešetke Single Photon Avalanche Diode (SPAD) elemenata sa brzim i sporim izlazom. U radu smo se fokusirali na kalibraciju sporog izlaza. Scintilacijska vlakna emitiraju fotone u kontaktu sa zrakom nabijenih čestica, poput elektrona i muona, te iste provode do fotoosjetljivog detektora sa visokom stopom efikasnosti. Za prikupljanje podataka se koristila razvojna pločica Citiroc 1A, proizvođača Weerock. Kućište koje drži pločicu sa SiPM čipovima i scintilacijska vlakna je 3D modelirano i printano na temelju mjera pločice. U sklopu rada je rad dvanaest SiPM čipova kalibriran, te su ispitane karakteristike rada u mraku i pod utjecajem simulacije izvora u obliku pulsirajuće plave LED, sa i bez scintilacijskih vlakana. Napravljene su staircase kalibracijske krivulje u ovisnosti o naponu reverzne polarizacije SiPM čipova i S-curve kalibracijske krivulje u ovisnosti o frekvenciji sata mjerenja, naponu na LED i duljini impulsa struje kroz LED. Zaključeno je da je idealno postaviti prag detekcije signala na 3.5 fotoelektrona, odnosno 400 DACu, kako bi se u potpunosti isključio šum elektronike, cross-talk efekt između različitih SPAD elemenata jednog SiPM čipa, te lažni signal zbog curenja svjetlosti. Također je zaključeno da scintilacijska vlakna značajno pospješuju detekciju signala.

KLJUČNE RIJEČI: MUonE, Citiroc 1A, SiPM, kalibracija

MUonE experiment: Muon identification

Abstract

Within CERN, there is an initiative for the development of a new muon detector under the name MUonE. It has determined a need for a new detection technology because of the age and loss of expertise in the maintaining and production of the existing experimental setups. A prototype muon detector based on scintillating fibers and Silicone Photo Multiplier (SiPM) chips has been proposed and made. SiPMs consist of an array of Single Photon Avalanche Diodes (SPAD) with both slow and fast outputs. Scintillation fibers emit photons in contact with a beam of charged particles, such as electrons and muons. They also act as an optical fiber and conduct said photons to photo sensitive detectors with a high degree of efficiency. Development board Citiroc 1A by the company Weerock was used for data acquisition. The housing of the SiPM board and scintillating fibers was modeled and 3D printed based on the measurements of said board. In the scope of this work, twelve SiPM detection channels have been calibrated. Their work has been characterised in both darkness and under the influence of a source simulation, with and without scintillating fibers. A blue LED was used as the source simulation. Staircase calibration curves were made in the response to the reverse polarisation potential of the SiPM chips, as well as S-curve calibration curves in the response to the measurement clock frequency, LED voltage and the duration of the current impulse through the LED. It was concluded that the threshold of detection should be set at 3.5 electronvolts, which is 400DACu. This completely excludes electrical noise, cross-talk effect between the different SPADs of one SiPM chip, and false positives due to light leakages. It has also been determined that the scintillating fibers significantly improve signal detection.

KEY WORDS: MUonE, Citiroc 1A, SiPM, calibration

Sadržaj

1	Uvod	1
2	Teorija	3
2.1	Anomalni magnetski moment	3
2.2	Što su SiPMovi i kako funkcioniraju?	4
2.2.1	Scintilacijska vlakna	7
3	Eksperimentalni postav	8
3.1	Kalibracijske krivulje	9
3.2	Dark count mjerenja	12
3.3	Mjerenja sa simulacijom izvora	16
3.4	Mjerenja sa simulacijom izvora i scintilacijskim vlaknima	18
4	Rezultati mjerenja i diskusija	21
4.1	Dark count mjerenja	21
4.2	Mjerenja sa simulacijom izvora	26
4.3	Mjerenja sa simulacijom izvora i scintilacijskim vlaknima	28
5	Zaključak	32
	Literatura	35

1 Uvod

Anomalija muona je jedan od gorućih problema moderne čestične fizike. Naime, nabijene čestice poput elektrona i njegovog težeg rođaka mijona, koje imaju svoju vlastitu kutnu količinu gibanja, spin \vec{s} , posjeduju vlastiti magnetski moment dan sa izrazom:

$$\vec{\mu} = g \frac{q}{2m} \vec{s}, \quad (1.0.1)$$

gdje je $\vec{\mu}$ magnetski moment, q naboj čestice, m masa čestice, a g žiromagnetski omjer.

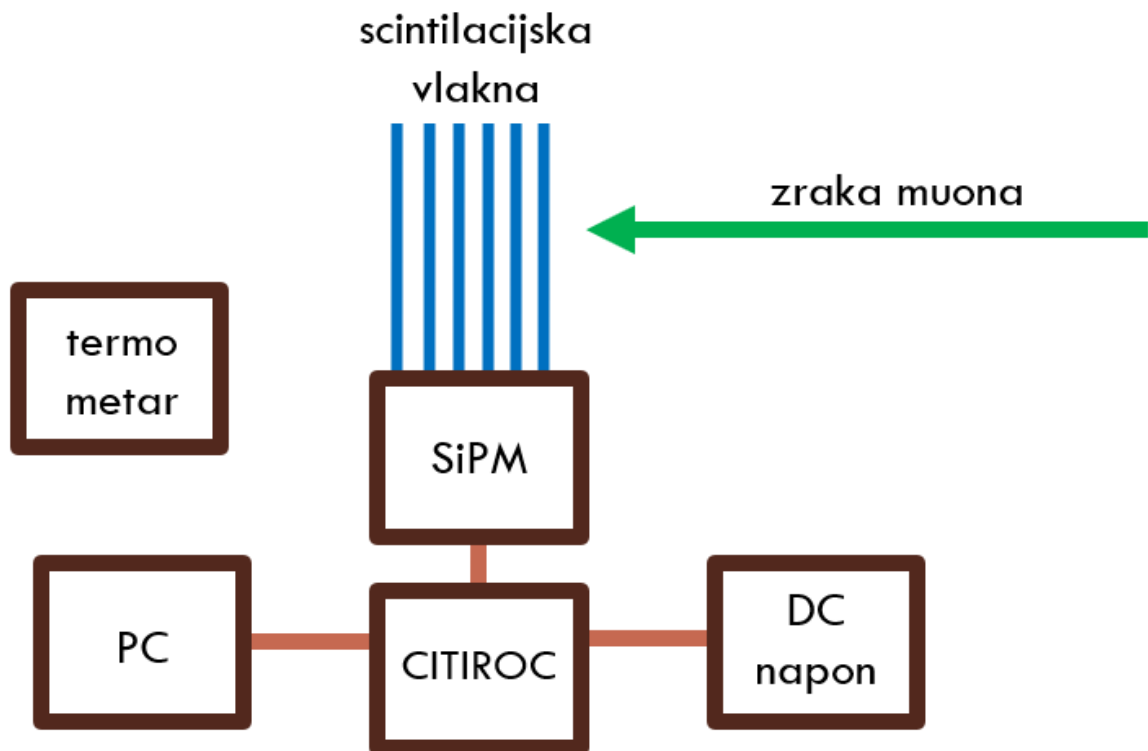
Dirac je još davne 1928. godine predvidio $g = 2$ za elektron i sve druge čestice intrinzičnog spina $1/2$. Međutim, vrijednost žiromagnetskog omjera počinje odstupati uključivanjem dodatnih efekata, poput relativističkih i kvantne elektrodinamike. To odstupanje se zove magnetska anomalija i dana je izrazom:

$$a_l = \frac{g_l - 2}{2}, \quad (1.0.2)$$

gdje je l oznaka za nabijeni lepton čiju anomaliju promatramo (elektron, mijon, tauon).

S obzirom da za muon imamo najpreciznija eksperimentalna mjerenja i teoretske izračune te veličine, a i smatra se da će muon, kao teži rođak elektrona, biti osjetljiviji na dosad nepoznate sile, magnetska anomalija se pokazala kao jedan od najobećavajućih testova za standardni model[7].

U sklopu radne skupine *Physics Beyond Colliders*, održane u CERNu 2016. godine, pojavila se ideja o novom eksperimentu, kojim bi se mogao nezavisno izmjeriti hadronski doprinos anomalija muona. Projekt je razrađen, predložen te se 2021. godine [10] krenulo sa realizacijom eksperimentalnog postava. Paralelno s time, došlo se do zaključka da trenutačna tehnologija detekcije muona pati od znakova starosti i gubitka ekspertize o njihovoj proizvodnji i održavanju. Stoga postoji potreba za razvojem detektora muona na alternativnoj tehnologiji [5]. Jedan od elemenata postava je i takozvani mijonski filter koji detektira čestice metodom koja se temelji na rešetkama od scintilacijskih vlakana. Prednosti takvog detektora su višestruke. Prije svega, može se relativno jeftino proizvesti interno jer proizvodni proces ne zahtjeva specijalizirane tehnologije. Dizajn takvog detektora bi bio modularan, što značajno olakšava održavanje i eventualni popravak. Scintilacijka vlakna ne zahtjevaju posebne uvjete za optimalni rad, poput visokog napona ili hlađenja, te ih je lako integrirati u postav. Efikasnost detekcije čestica je 90%, a prostornu preciznost diktira debljina korištenih vlakana [5].



Slika 1.1: Skica prototipa detektora muona na principu scintilacijskih vlakana.

Skica takvog detektora je prikazana na slici 1.1. U ovom radu, fokusirali smo se na testiranju i kalibraciji prototipa detektora na bazi scintilacijskih vlakana. Ispitano je ponašanje u mraku i sa simulacijom izvora, sa i bez scintilacijskih vlakana. Konačno, na temelju kalibracijskih krivulja, predložene su optimalne postavke za daljnju upotrebu i testiranje ovog prototipa.

2 Teorija

2.1 Anomalni magnetski moment

Dosadašnji teoretski proračuni anomalije mijona uključuju sve doprinose standardnog modela:

$$a_{\mu}^{SM} = a_{\mu}^{QED} + a_{\mu}^{EW} + a_{\mu}^{HVP} + a_{\mu}^{HLbL}. \quad (2.1.1)$$

a_{μ}^{QED} je doprinos kvantne elektrodinamike, i uključuje sve doprinose fotona i leptona, izračunatih do reda pete petlje, što je sveukupno 12672 Feynmanovih dijagrama. a_{μ}^{EW} je doprinos elektroslabe sile, te uključuje doprinos svih Feynmanovih dijagrama koji uključuju barem jedan W , Z ili $Higgs$ bozon. Izračun je proveden do drugog reda petlji, sa trećim redom procjenjenim. Ima relativno mali doprinos zbog velike mase tih bozona. a_{μ}^{HVP} je doprinos vakuumske polarizacije hadrona, a a_{μ}^{HLbL} doprinos hadronskog raspršenja svjetla na svjetlu. Oba doprinosa se u novije vrijeme računaju oslanjajući se na eksperimentalne podatke, ili primjenom teorije kvantne kromodinamike na rešetku. [7]

Trenutni najprihvaćeniji teoretski izračuni anomalije muona iznosi[7]:

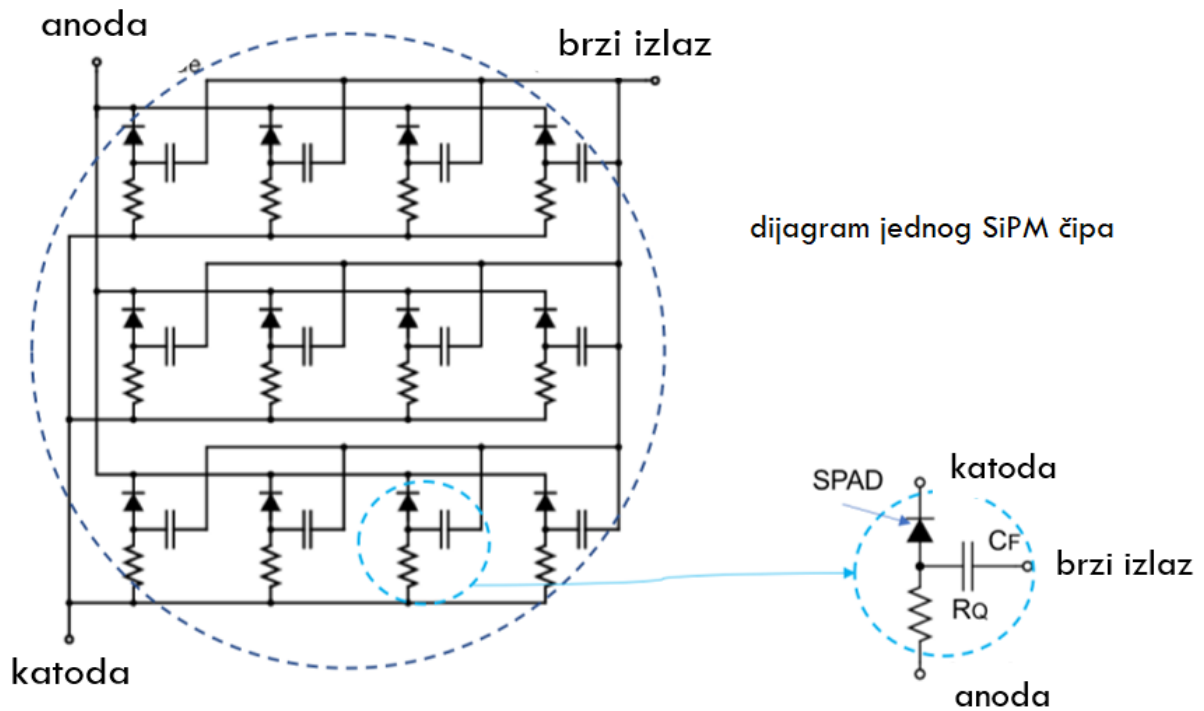
$$a_{\mu}^{SM} = 116591810(43) \times 10^{-11}(0.37ppm). \quad (2.1.2)$$

Srednja vrijednost anomalije mijona dosad provedenih eksperimenata iznosi[7]:

$$a_{\mu}^{EXP} = 116592061(41) \times 10^{-11}(0.35ppm). \quad (2.1.3)$$

2.2 Što su SiPMovi i kako funkcioniraju?

Ključni dio prototipa detektora su *Silicone Photon Multiplier* senzori, skraćeno *SiPM*. Oni se sastoje od mreže pojedinačnih lavinskih dioda *Single Photon Avalanche Diode*, skraćeno *SPAD*, prikazano na slici 2.1.



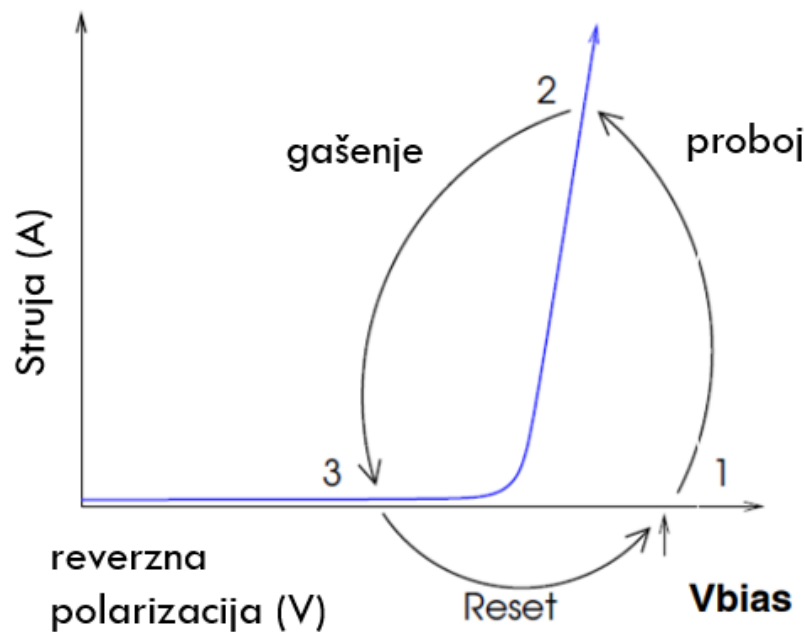
Slika 2.1: Shema tipičnog SiPM čipa. Slika preuzeta i prilagođena iz [6].

Kada foton udari u jedan SPAD, on šalje karakteristični signal jednog fotoelektrona prema svojem sporom izlazu, tj. glavnog strujnog kruga spojenog na anodu i katodu. Ako više SPAD-ova okine u istom trenutku, taj signal se zbraja. Što zapravo predstavlja jednu od prednosti SiPM detektora: mogu uspješno registrirati istovremenu detekciju više fotona. Osim toga, ako nas ne zanima broj fotona, već nam je najbitnija informacija trenutak detekcije, svaki SPAD je kondenzatorom C_F AC spregnut na kontakt brzog izlaza. Spori izlaz je zapravo strujni signal, dok je brzi naponski. Slika ekrana osciloskopa koja prikazuje obje vrste signala je prikazana na 2.2.



Slika 2.2: Slika osciloskopa koja prikazuje Fast output (žuta) i High gain slow shaper output (roza). Brzi izlaz pokazuje samo detekciju fotona, bez informacije o broju, dok za spori izlaz vidimo karakteristični oblik signala fotoelektrona, te su jasno vidljive razlike signala za jedan, dva, tri, četiri, itd. fotoelektrona.

Princip rada jednog SPADa je sljedeći: dioda je reverzno polarizirana do napona proboja. Kada foton udari u diodu u području kontakta p i n dijelova silicija, pobuđuje elektrone u vodljivu vrpcu. Kako je dioda reverzno polarizirana na visoki napon (tipično 50-70V), taj elektron se jako ubrzava i pobuđuje elektrone u sudarima sa kristalnom rešetkom. Pokrenuta je lavina i teče struja. Kako struja raste, smanjuje se napon na diodi, i ona izlazi iz područja napona proboja, otpor raste i struja prestane teći, te se dioda gasi. Nakon toga napon preko diode ponovno raste nazad na početnu vrijednost, i dioda je spremna za ponovno okidanje. Vrijeme potrebno za ponovno polariziranje diode se zove vrijeme oporavka. Kako bi ono bilo što kraće, potrebno je dodatno ograničiti struju lavine otpornikom R_G . Cijeli proces je prikazan na slici 2.3.



Slika 2.3: Shema tipične Single Photon Avalanche Diode (SPAD). Slika preuzeta i prilagođena iz [6].

Glavni izvor šuma u mjerenjima SPAD-om je tzv. "dark count" signal, odnosno lažni signal. Naziv potječe od toga što se mjeri tako da se detektor maksimalno izolira od svjetlosti, te u takvim uvjetima bilježi broj detekcija signala. Dark count se sastoji od nekoliko doprinosa. Prvi i najznačajniji su takozvani termalni elektroni. Zbog termalnih oscilacija kristalne rešetke, dolazi do statistički slučajnog pobuđivanja elektrona iz valentne vrpce koji se onda ubrzavaju u velikoj razlici potencijala preko diode i izazivaju lavinu. Nemoguće ju je po svojstvima signala razlikovati od lavine izazvane fotonima. Lažni signal, odnosno šum je tipično reda veličine jednog fotoelektrona. Zbog ovog efekta svi SiPM detektori funkcioniraju sa većom preciznošću pri nižim temperaturama. Već i 10° niža temperatura pokazuje drastično smanjenje šuma. Drugi po doprinosu je tzv. "cross talk" između pojedinih SPAD ćelija. Naime, okidanjem jedne SPAD ćelije, može doći do emitiranja sekundarnih fotona, tipično u infracrvenom spektru koji onda mogu relativno daleko putovati kroz materijal, te potom izazovu okidanje u susjednoj SPAD ćeliji. Šum cross-talka tipično vidimo kao lažne signale dva ili tri ili više fotoelektrona. Konačni doprinos je tzv. "afterpulsing". Naime, tijekom lavine, može se desiti da pojedini elektroni zapnu na defektima rešetke, te se nakon nekog vremena oslobode iz tog defekta i okinu još jednu lavinu, po sličnom principu kao i termalni elektroni. Ovaj doprinos se minimalizira pažljivom i preciznom proizvodnjom, kako bi se uklonili defekti u rešetkama dioda[6].

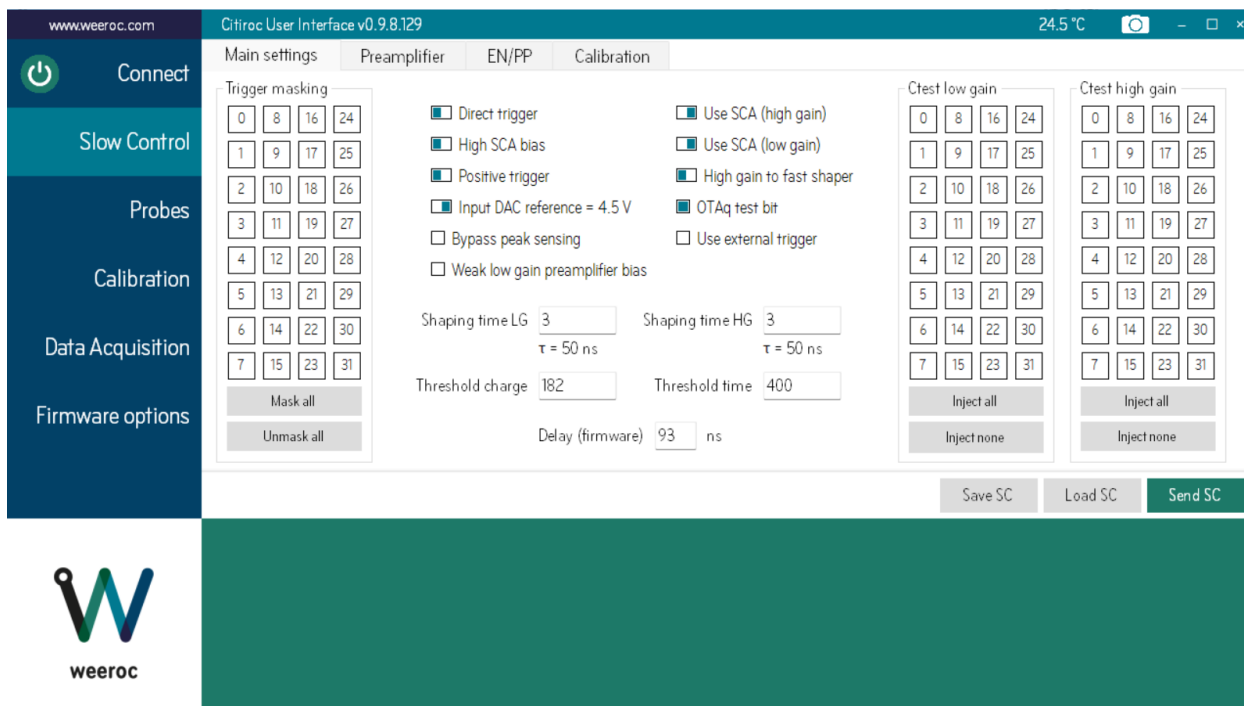
2.2.1 Scintilacijska vlakna

Fotone u vidljivom području koje je moguće detektirati SiPM-ovima dobijamo upotrebom scintilacijskog materijala. Prolaskom nabijene čestice kroz materijal nastaju fotoni vidljive svjetlosti u procesu scintilacije. Scintilacija je efekt pri kojem čestica sudarom pobuđuje valentni elektron u više stanje koji prelaskom u svoje osnovno stanje, emitira foton. Dodatno se ovaj princip proizvodnje fotona može pospješiti dodavanjem fluorescentnih boja koje apsorbiraju emitirane fotone, i reemitiraju ih pri većim valnim duljinama, dalje od područja snažnog prigušenja samog scintilacijskog materijala. U ovom radu je isproban materijal u obliku plastičnih scintilacijskih vlakana koja, osim što detektiraju nabijene čestice, vode fotone do detektora principom totalne unutarnje refleksije. Tipično je pokrov scintilacijskih vlakana napravljen od različitog materijala od scintilacijske jezgre kako bi se osigurao dovoljno veliki omjer indeksa loma svjetlosti i osigurali uvjeti za totalnu refleksiju, čime se smanjuje gubitak fotona.

3 Eksperimentalni postav

Eksperimentalni dio ovog rada je podijeljen u tri etape. U prvoj etapi je mjereno ponašanje svakog SiPM kanala u totalnom mraku kako bi se dobio tzv. "dark count" pri različitim postavkama naponskog praga detekcije. S obzirom na dobivene kalibracijske "staircase" krivulje, SiPM kanali su kalibrirani finim podešavanjem prednapona kojim se polarizira pojedinačni SiPM. Nakon toga su mjerenja provedena sa simulacijom izvora nabijenih čestica. U našem slučaju je to bila plava LED dioda, koja je emitirala svjetlost u pulsevima. Na kraju su na SiPM čipove bila pričvršćena scintilacijska vlakna, te su ista bila osvijetljena izvorom iz drugog dijela mjerenja. Na temelju svih obavljenih mjerenja, moguće je precizno zadati prag tako da se minimalizira lažni pozitivni signal, a maksimizira vjerojatnost detekcije pravog signala kojeg pokušavamo izmjeriti.

Korišten je SiPM modul sa 32 kanala *Prototype SiPM BE-BI-EA*, CERN-ove produkcije, koji sadrži SiPM čipove modela *Hamamatsu S13360-1350PE*. Isti je bio spojen na razvojnu pločicu *Citiroc 1A*, proizvođača *Weerock*. Mjerenja su prikupljena pomoću programa *Citiroc User Interface 0.9.8.129*., proizvođača razvojne pločice. Tijekom svih mjerenja su korištene "slow control" postavke prikazane na slici 3.1. Izvor istosmjernog napona kojim je napajan SiPM modul je bio *BK PRECISION 9184 DC Power Supply*. Korišten je osciloskop *SIGILENT sds2102X Plus*, izvor naponskih pulseva za simulaciju izvora *TTi 25Mhz Dual Function/Amplitude/Anb/Pulse Generator TG2512A LXI*, te je pomoću multimetra *FLUKE 179 True RMS Multimeter* bila mjerena temperatura laboratorija tijekom mjerenja. SPAD su iznimno osjetljive na radnu temperaturu, no u našem slučaju, nismo bili u mogućnosti strogo kontrolirati ili kompenzirati temperaturu, te je to stoga glavni izvor greške u ovom radu. Temperatura laboratorija tijekom mjerenja je bila $21.6 \pm 0.9^\circ$.

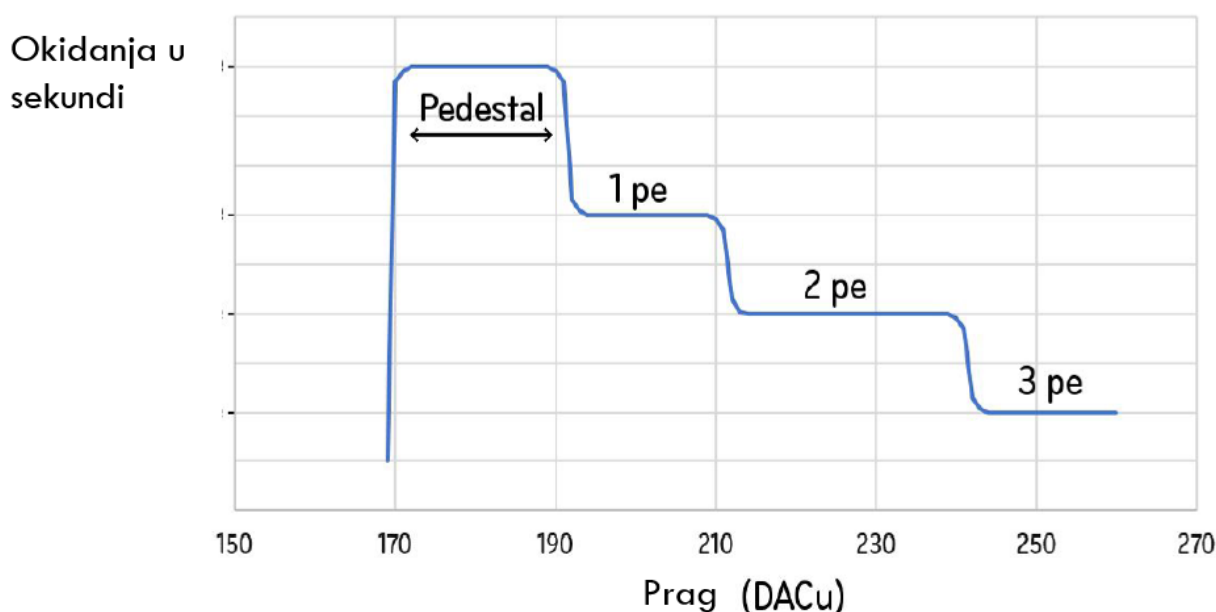


Slika 3.1: Slow control postavke korištene tijekom svih mjerenja u programu *Citiroc User Interface 0.9.8.129*. Bitno je primjetiti da je korištena opcija "Direct trigger", te da su uključene postavke za SCA. Ovisno o režimu u kojem se mjere kalibracijske krivulje ("charge" ili "time"), potrebno je drugi prag namjestiti iznad razine postolja. Naše kalibracijske krivulje su bile mjerene u nabojnom režimu, te je stoga prag za vrijeme bio podešen relativno visoko, na 400.

3.1 Kalibracijske krivulje

Mjerenja se temelje na dvije kalibracijske krivulje. Prva od kojih se zove "staircase", zbog svoje sličnosti stepenicama u svom izgledu. Primjer tipične staircase krivulje je prikazan na slici 3.2. Mjerenja se provode tako da se broje detekcije signala u nekom vremenskom intervalu, za različite razine praga detekcije. Kako dižemo prag detekcije, prvo svojstvo koje možemo izmjeriti jest razina šuma same elektronike, tzv. "pedestal". Kako se prag diže iznad razine šuma elektronike, frekvencija detekcije signala se dramatično smanjuje. Sljedeća stepenica na grafu jest razina signala koju proizvodi jedan foton koji izaziva lavinu u nekom od SPAD-ova u SiPM-u danog kanala. S obzirom da ne mjerimo jedan foton, već elektrone koje on pobudi, ovo se u struci naziva fotoelektron, sa standardnom kraticom "pe". Kao što je objašnjeno u prethodnom poglavlju, svaki foton generira signal istog oblika i visine. Dizanjem praga detekcije iznad razine jednog fotoelektrona, stepenica se opet dramatično spušta. U prethodnoj stepenici smo mogli detekti-

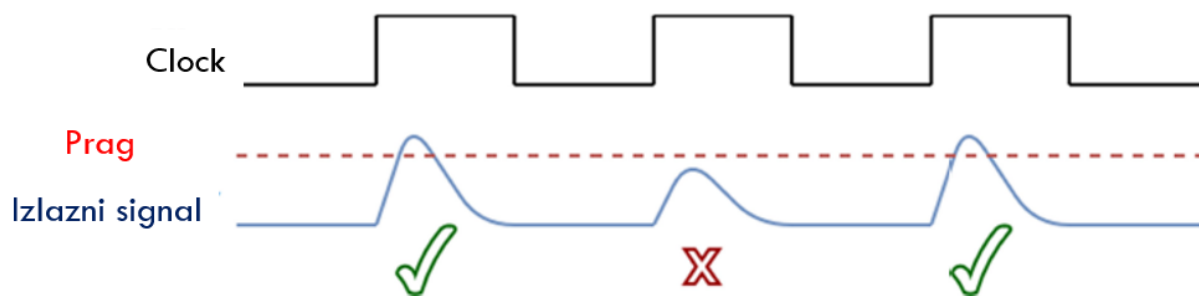
rati sve signale iznad razine pedestal, kojima dominiraju pojedini fotoni, dok dizanjem iznad te razine isključujemo sve signale osim onih sa više fotona, odnosno fotoelektrona. Distinkcija fotona i fotoelektrona je nužna jer to nisu samo situacije u kojima više SPAD-ova jednog SiPM-a istovremeno detektira foton, već i one u kojima dođe do cross-talka. Iz ove kalibracijske krivulje možemo odrediti kolika nam je razina šuma s obzirom na preciznost signala koje želimo mjeriti. Na primjer, ako nam je dark count reda veličine $10^6 Hz$ za određenu konfiguraciju detektora za $1pe$, onda s takvim postavom ne možemo raditi kvalitetna mjerenja signala pri kojima očekujemo da do detektora dolaze fotoni jedan po jedan.



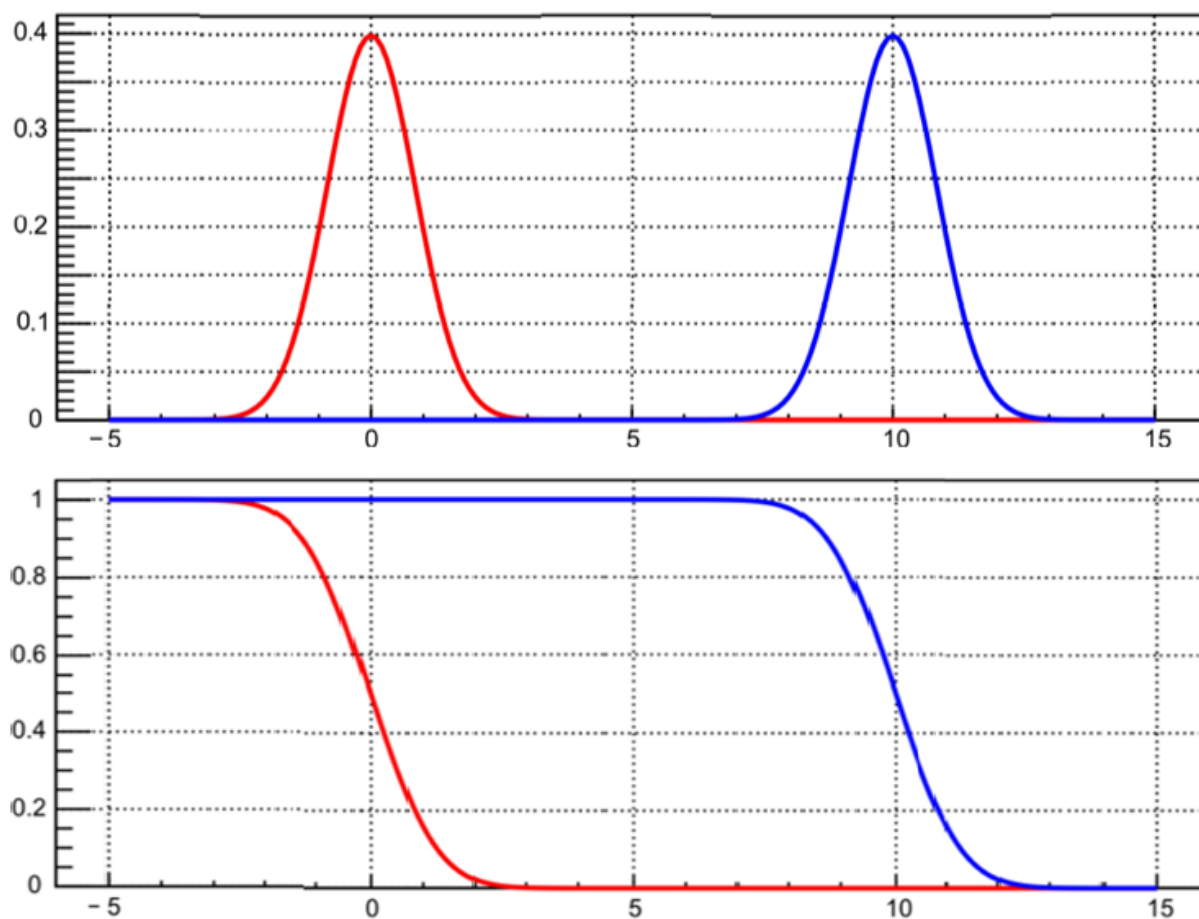
Slika 3.2: Tipična staircase krivulja. Slika preuzeta iz proizvođačevih uputstva za upotrebu *Citiroc IA* pločice [1].

Druga kalibracijska krivulja, tzv. "S-curve", mjeri vjerojatnost detekcije signala unutar zadannog intervala, za različite razine praga detekcije. Interval tijekom kojeg se testira da li je došlo do detekcije ili ne je zadan frekvencijom sata mjerenja. Što je frekvencija veća, interval je manji. Ovo je slikovno prikazano na slici 3.3. Ako pretpostavimo da razina signala slijedi Gaussovu raspodjelu, onda dizanjem praga detekcije vjerojatnost detekcije signala monotono pada od 100% do 0%, s time da se na 50% vjerojatnosti detekcije nalazimo na srednjoj vrijednosti razine signala. Ovo je slikovno prikazano na 3.4. Ova kalibracijska krivulja se tipično crta za dark count mjerenja i mjerenja željenog signala istovremeno. Služi tome da možemo odabrati optimalnu razinu praga koja maksimizira vjerojatnost detekcije željenog signala, dok istovremeno minimalizira

vjerojatnost da ćemo detektirati šum ili neželjeni signal[9].



Slika 3.3: Ilustracija principa mjerenja S curve kalibracijske krivulje. Slika preuzeta iz proizvođačevih uputstva za upotrebu *Citiroc IA* pločice [1].



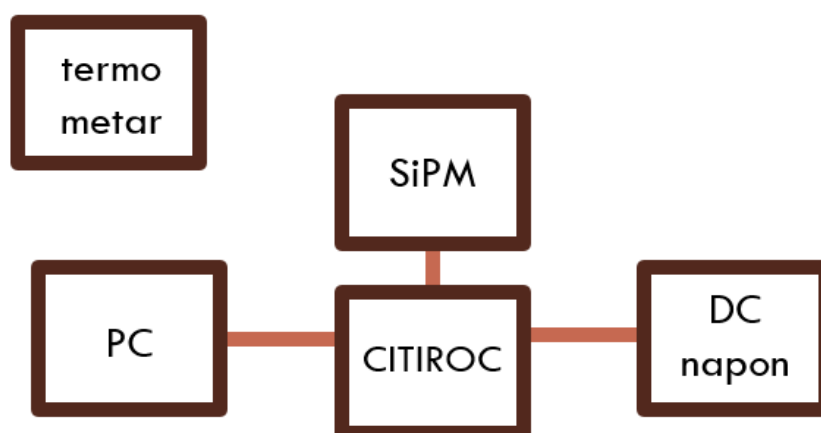
Slika 3.4: Usporedba S curve kalibracijske krivulje i Gaussove raspodjele razine signala.

Slika preuzeta iz proizvođačevih uputstva za upotrebu *Citiroc IA* pločice [1].

3.2 Dark count mjerenja

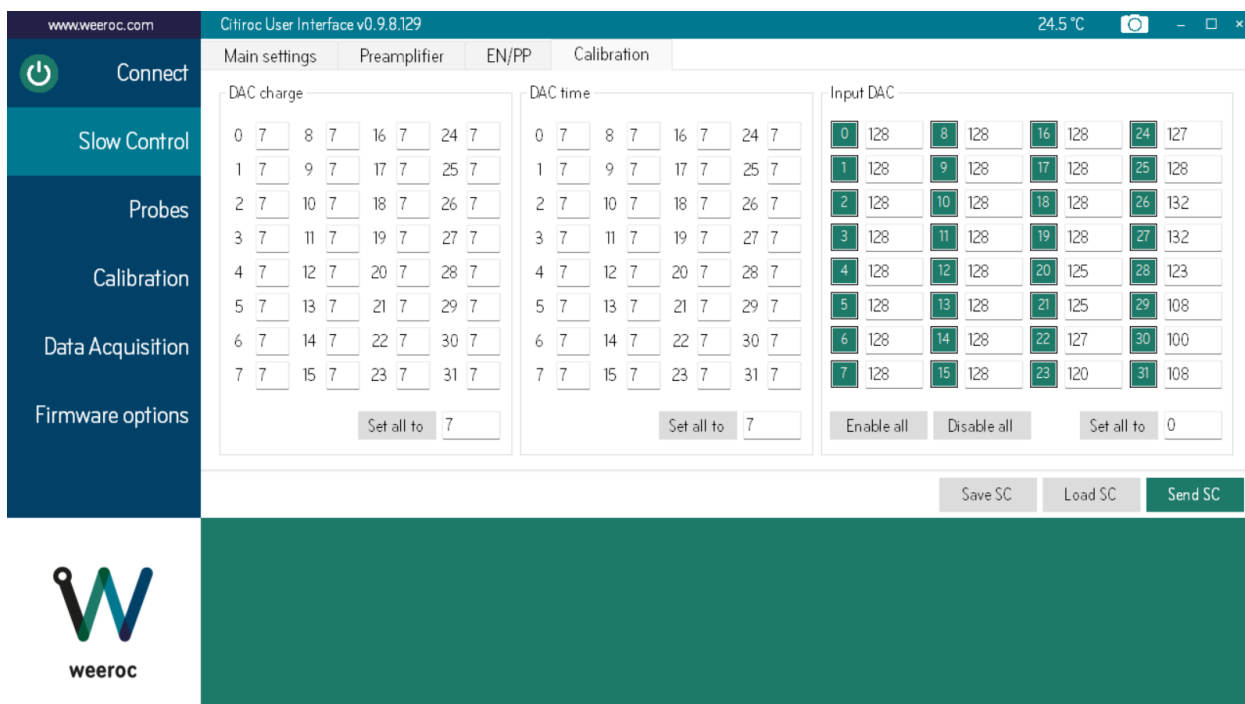


Slika 3.5: Slika postava za dark count mjerenja.

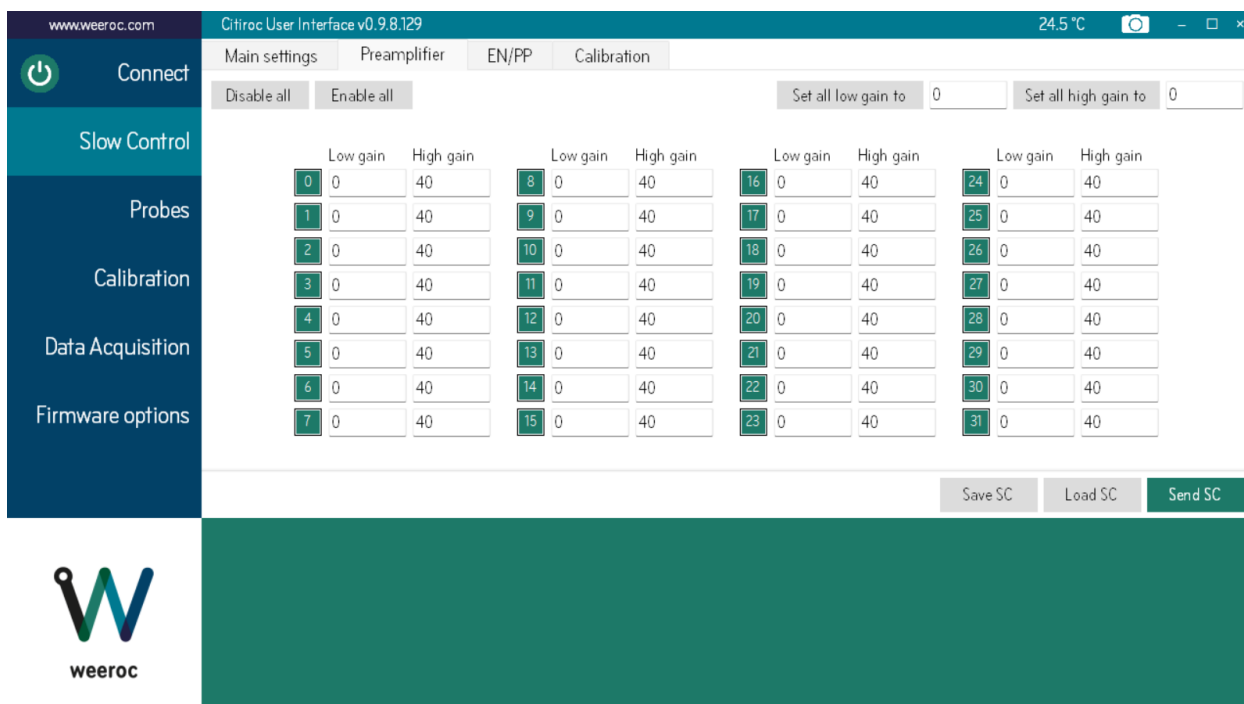


Slika 3.6: Skica postava za dark count mjerenja.

U prvom dijelu eksperimenata u ovom radu je mjereno ponašanje SiPM-ova u mraku, to je tzv. "dark count rate". Pločica SiPM modula bila je zatvorena u crnom kućištu i zamotana u crne neprozirne krpe. Izmjerene su staircase i S curve kalibracijske krivulje pri različitim postavkama i prednaponima. Staircase krivulje za različite kanale se u pravilu nisu poklapale. To je zbog slučajne varijacije u parametrima dioda. Najbitniji od tih parametara je napon proboja. Stoga se SiPM-ovi kalibriraju tako da se fino podešava točan prednapon koji svaki od njih dobiva preko postavke "Input DAC", vidi sliku 3.7. Ako rezultati još uvijek nisu zadovoljavajući, odaziv se može dodatno podešavati preko dvije grane pojačanja, "High gain" i "Low gain", vidi sliku 3.8. U našem slučaju je bilo dovoljno samo podešavati prednapon. Kalibracija se provodi tako da se postigne poklapanje u točkama pregiba stepenica za sve krivulje. Time se zapravo postiže da su visina i oblik signala za jedan, dva, tri i više fotoelektrona isti za sve kanale. Ovu kalibraciju je potrebno mjeriti za sve kanala koji su nam potrebni istovremeno, zato što cross talk značajno utječe na rezultate dark count mjerenja. Zbog ovoga smo se u ovom radu ograničili na kalibraciju kanala u intervalu 20 do 31.

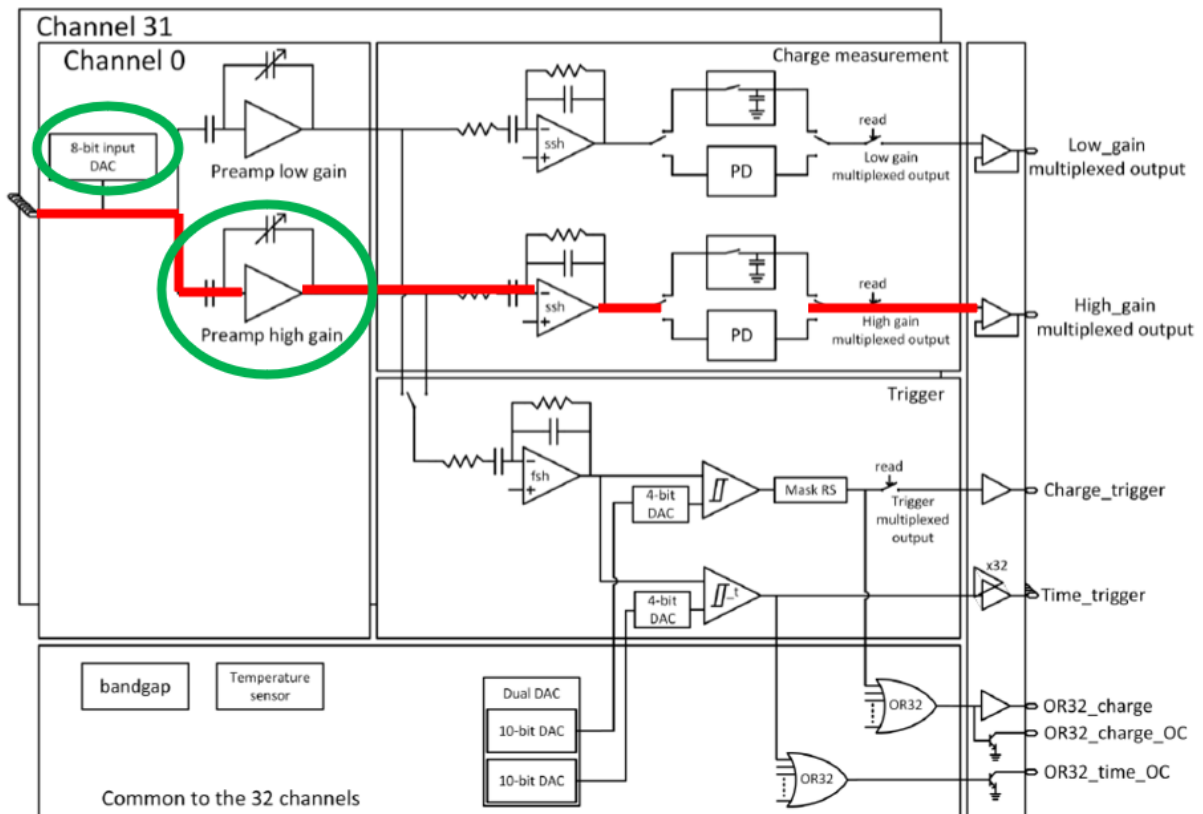


Slika 3.7: Slow control postavke prednapona Input DAC u programu *Citiroc User Interface 0.9.8.129*. Prikazane postavke su one postignute na kraju kalibracije kanala 20 do 31.



Slika 3.8: Slow control postavke pojačanja High gain i Low gain grane u programu *Citiroc User Interface 0.9.8.129*.. Prikazane postavke su one postignute na kraju kalibracije kanala 20 do 31.

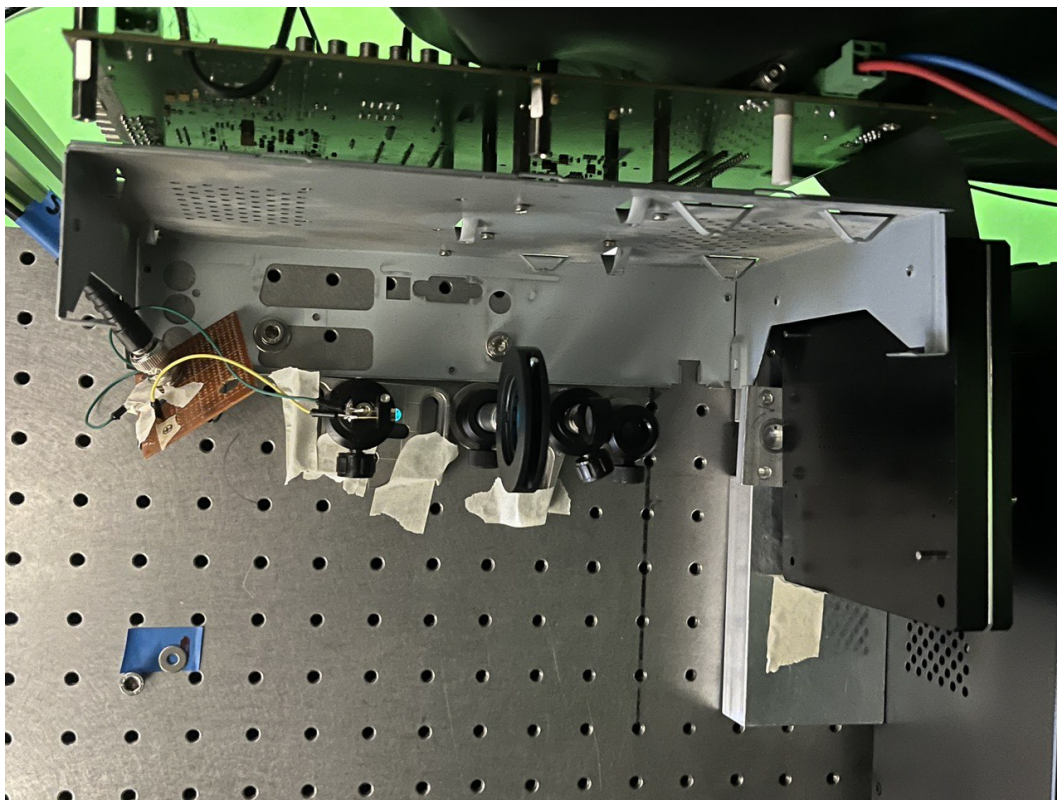
Sama *Citiroc IA* pločica ima tri grane mjerenja za svaki ulazni kanal: "High gain", "Low gain" i "Fast output". Prve dvije grane, High gain i Low gain, omogućavaju mjerenja sa dvije različite postavke pojačanja, koje se mogu zasebno podešavati za svaki kanal u postavkama na slici 3.8. Te dvije grane čine tzv. "Slow output", i na izlazu dobivamo prepoznatljiv oblik signala jednog fotoelektrona. Fast output je kondenzatorski spojen na svaki SPAD svakog SiPM čipa, kao što je prikazano na slici 2.1, i kao izlaz daje samo šiljak pri detekciji fotona, bez karakterističnog oblika signala. Slow shaper signal sadrži informaciju i o naboju, odnosno broju istovremenih fotoelektrona, dok je Fast shaper output nešto brži i daje samo informaciju o detekciji signala koji prelazi prag. Fast shaper output je bolji izbor ako želimo preciznija mjerenja vremena u kojem foton dolazi do detektora jer ignorira razlike u vremenu porasta signala [8]. *Citiroc IA* pločica omogućava istovremeno mjerenje svih triju grana detekcije. U ovom radu smo se fokusirali na High gain granu. Simbolička shema sklopa za prikupljanje podataka *Citiroc IA* pločice je prikazana na slici 3.9.



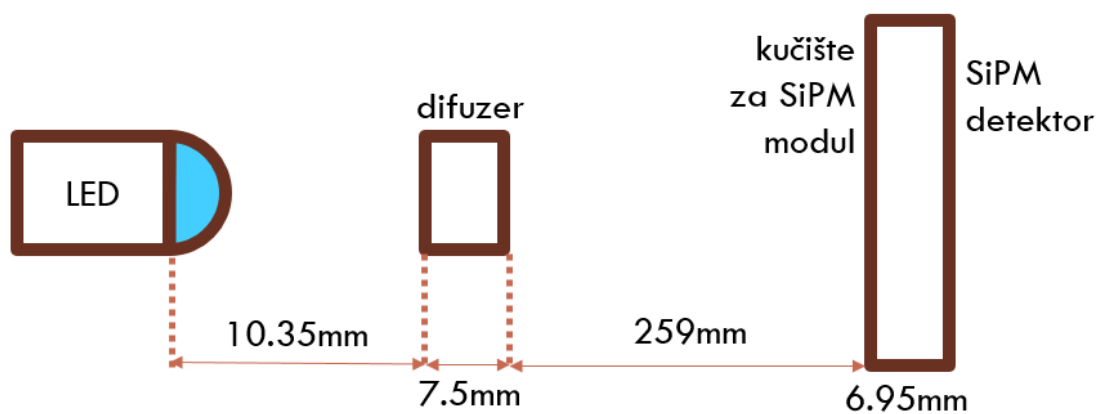
Slika 3.9: Usporedba S curve kalibracijske krivulje i Gaussove raspodjele razine signala.

Slika preuzeta iz proizvođačevog datasheeta *Citiroc IA* pločice [2].

3.3 Mjerenja sa simulacijom izvora



Slika 3.10: Slika postava za mjerenja sa simulacijom izvora.



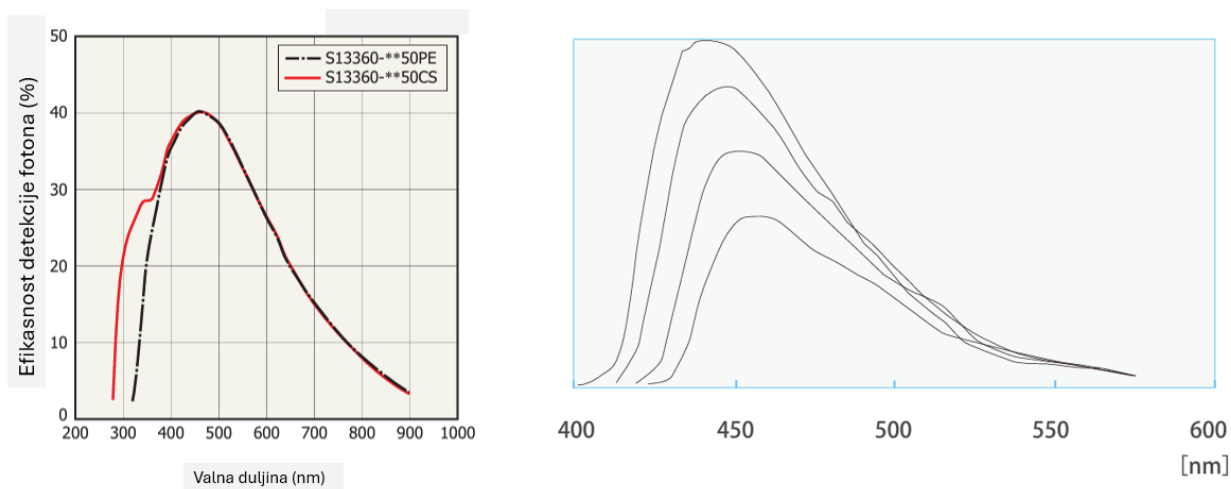
Slika 3.11: Skica postava za mjerenja sa simulacijom izvora, sa naznačenim udaljenostima.

Nakon mjerenja u mraku, bitno je bilo ustanoviti ponašanje stvarnog signala kojeg želimo mjeriti. Odnosno, da li ga možemo sa velikim stupnjem sigurnosti razaznati i razlikovati od šuma elektronike i dark count mjerenja. U tu svrhu koristimo LED modela *490L Thorlabs*, kroz koju prolaze pulsevi napona frekvencijom od $17kHz$. Korišteni SiPM čipovi su najosjetljiviji na svjetlost valne duljine $450nm$, a korištena LED emitira svjetlost valne duljine $490 \pm 10nm$. Korišteni pulsevi su bili visine $3.290V$ (po datasheetu korištene diode, ona optimalno radi na $3.2V$), duljine $30ns$. Pri kraju impulsa se napon spuštao u $-1.000V$, kako bi se pospješilo brzo gašenje svjetlosti jer se negativnim naponom brže sama dioda isprazni od nosioca naboja [4]. Otpor izlaza signala je bio $9.130k\Omega$, delay $0ns$, a edge $10ns$. Ovaj postav je napravljen po uzoru na rad [3]. Između LED i SiPM detektora je bio postavljen difuzer *LMR0.5/M Thorlabs*, dok je LED stajala na nosaču *LEDM5F Thorlabs*. Sa LED je u seriju bio spojen i otpornik 150Ω kako bi se ograničila maksimalna struja koja može prolaziti kroz nju, i spriječila šteta. Slika postava je prikazana na 3.10. Na njemu je vidljiva i zjenica čija je svrha bila dodatno ograničiti količinu svjetlosti koja dolazi do SiPM detektora, no u konačnoj verziji postava je bila uklonjena zbog bolje uniformnosti u količini svjetlosti koje stižu do različitih kanala detektora. Cijeli postav je držan u mraku, zaklonjen komadima kartona i nepropusnom crnom tkaninom. Skica postava sa naznačenim udaljenostima je prikazana na 3.11.

3.4 Mjerenja sa simulacijom izvora i scintilacijskim vlaknima

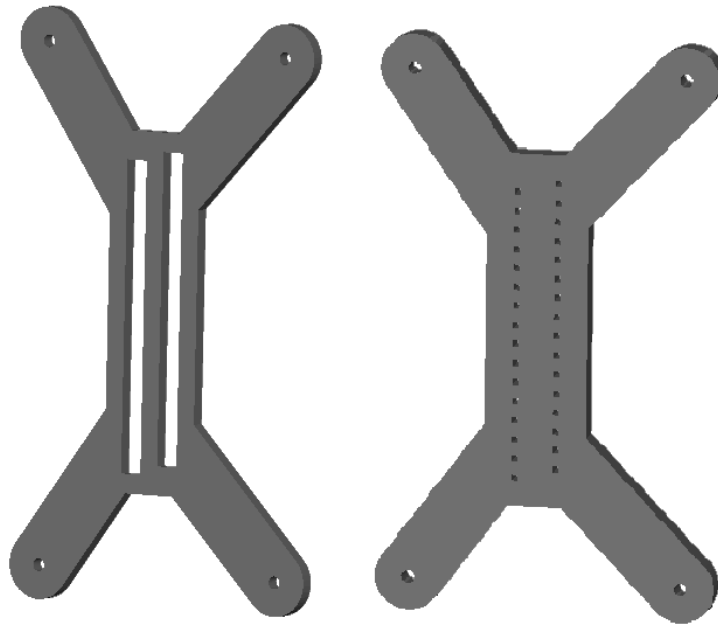


Slika 3.12: Slika postava za mjerenja sa simulacijom izvora i scintilacijskim vlaknima.

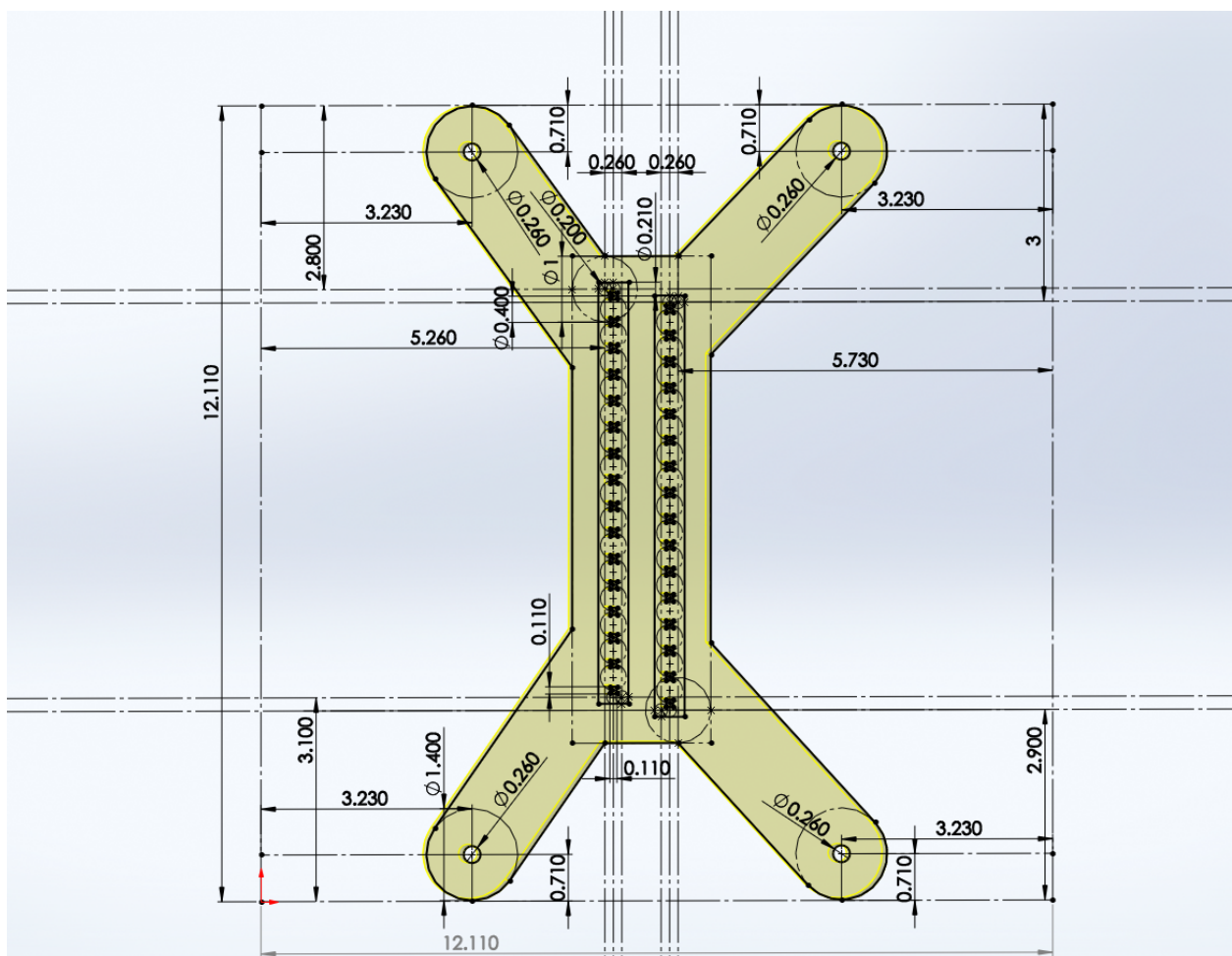


Slika 3.13: Grafovi odaziva SiPM čipova, lijevo, i vlakana, desno, na različite valne duljine. Slike su preuzete i prilagođene iz [12] [11].

U zadnjoj dionici mjerenja je isprobano ponašanje sa scintilacijskim vlaknima. Korištena su scintilacijska vlakna *Kuraray SCSF-78* kvadratastog presjeka $1\text{mm} \times 1\text{mm}$, te duljine 50cm. Ta vlakna rezoniraju na 450nm valne duljine svjetlosti, svjetlost pri izlasku iz njih ima valnu duljinu 350nm , dok je atenuacijska duljina 4m , značajno veća od duljine korištene u našem postavu[11]. Na slici 3.13 su prikazani grafovi odaziva korištenih SiPM čipova i scintilacijskih vlakana, dani u tehničkim specifikacijama proizvođača. Desni graf prikazuje emisijski spektar samih scintilacijskih vlakana, u arbitrarnim mjernim jedinicama intenziteta svjetlosti, za duljine vlakna 10, 30, 100 i 300cm (monotono padajući odaziv). Lijevo graf prikazuje efikasnost detekcije fotona SiPMova za različite valne duljine. Može se uočiti dobro poklapanje maksimuma emisije scintilacijskog spektra vlakana sa maksimumom detekcije fotona SiPMova, te stoga očekujemo minimalan gubitak signala. Za vlakna je modeliran i 3D printan držač koji ih drži u kontaktu sa SiPM detektorima. Slika 3D modela držača je prikazana na 3.14, dok je skica sa mjerama prikazana na slici 3.15. Držač se sastojao od dva dijela: baze koja ide direktno na pločicu, te perforiranog dijela koji drži sama vlakna. Napravljen je u dva dijela kako bi se osiguralo da su sve relevantne plohe ravne i sve rupe perforiranog dijela prohodne pri završetku 3D printanja. Vlakna su ljepljena na taj držač dvokomponentnim epoxy ljepilom. Kao što je vidljivo i na slici postava 3.12, vlakna su bila svinuta pod lukom tako da, kada se postav pokrije kartonom i neprozirnom crnom tkaninom, svjetlost LED dioda ne dopire direktno do SiPM detektora, već jedino putem vlakana. Vlakna su bila povezana gumicom, radi osigiravanja uniformnosti u položaju i kutu prema difuzeru, te naslonjena direktno na staklo difuzera. Modeli i udaljenosti između difuzera i LED su ostali nepromjenjeni u usporedbi sa prethodnim eksperimentom. Tijekom mjerenja se ispostavilo da scintilacijska vlakna provode svjetlost značajno bolje od očekivanog, te da se postiže saturacija detektora sa postavkama pulseva iz prethodnog eksperimenta. Stoga je visina napona pulsa smanjena na 3.030V . Ostale postavke pulseva su ostale nepromjenjene.



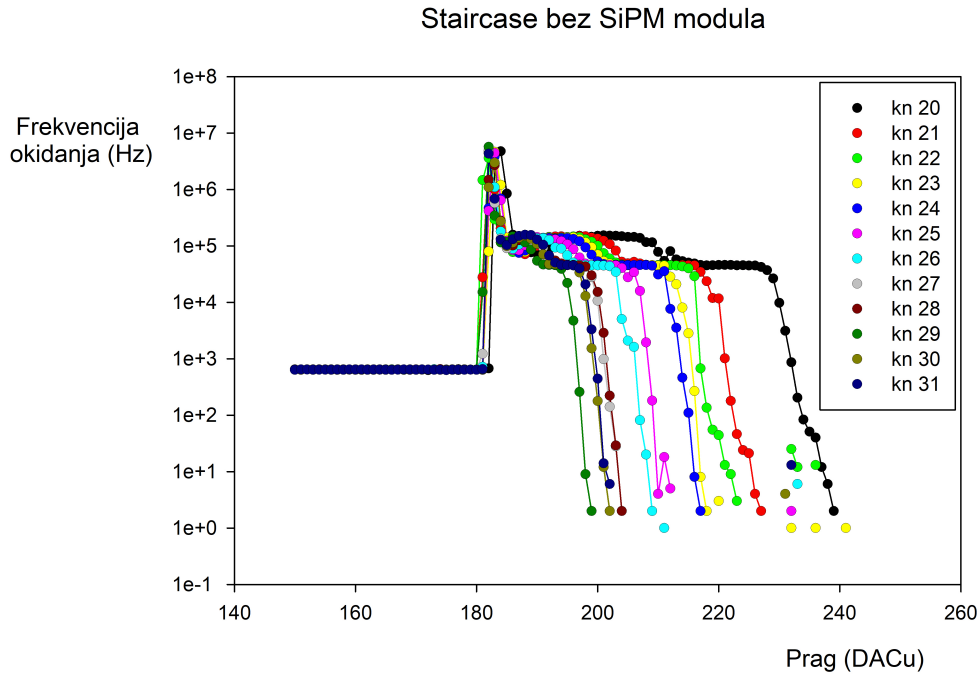
Slika 3.14: 3D model držača za scintilacijska vlakna.



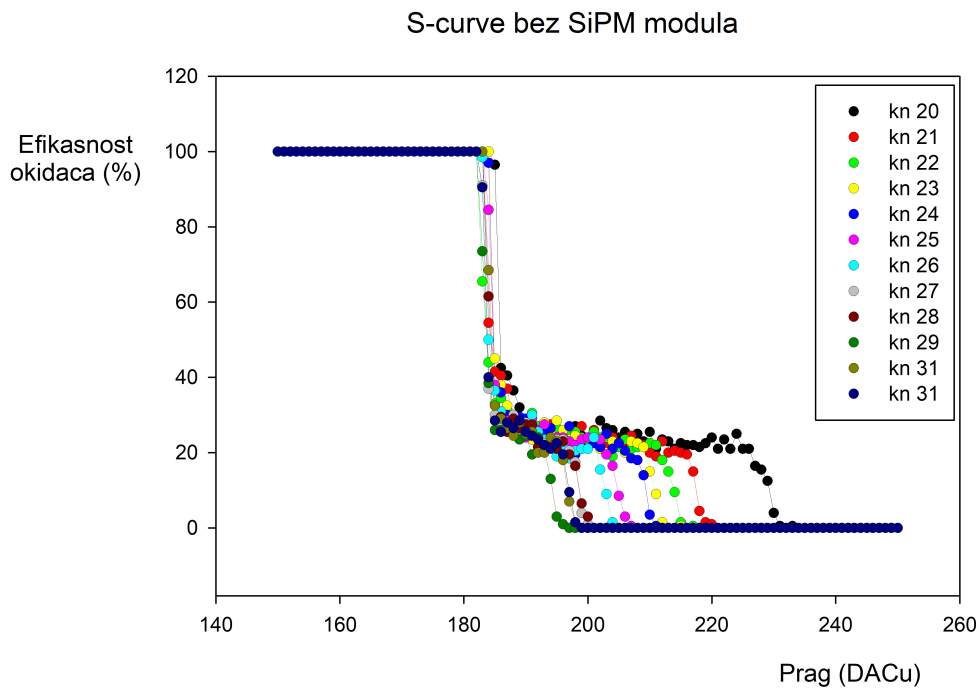
Slika 3.15: Skica sa mjerama 3D modela držača za scintilacijska vlakna.

4 Rezultati mjerenja i diskusija

4.1 Dark count mjerenja



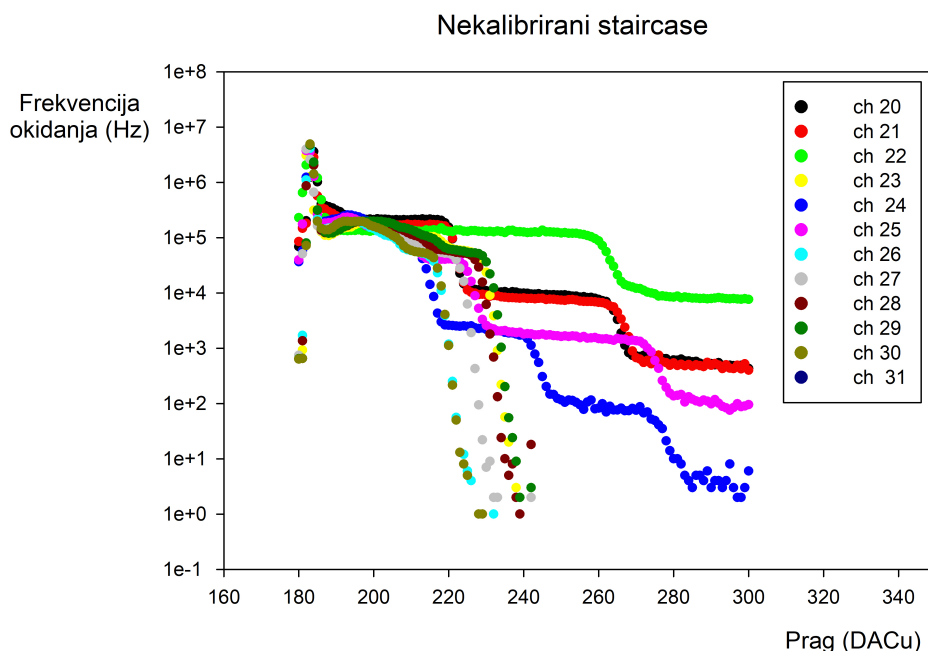
Slika 4.1: Graf mjerenja kalibracijske krivulje staircase bez spojenog SiPM modula.



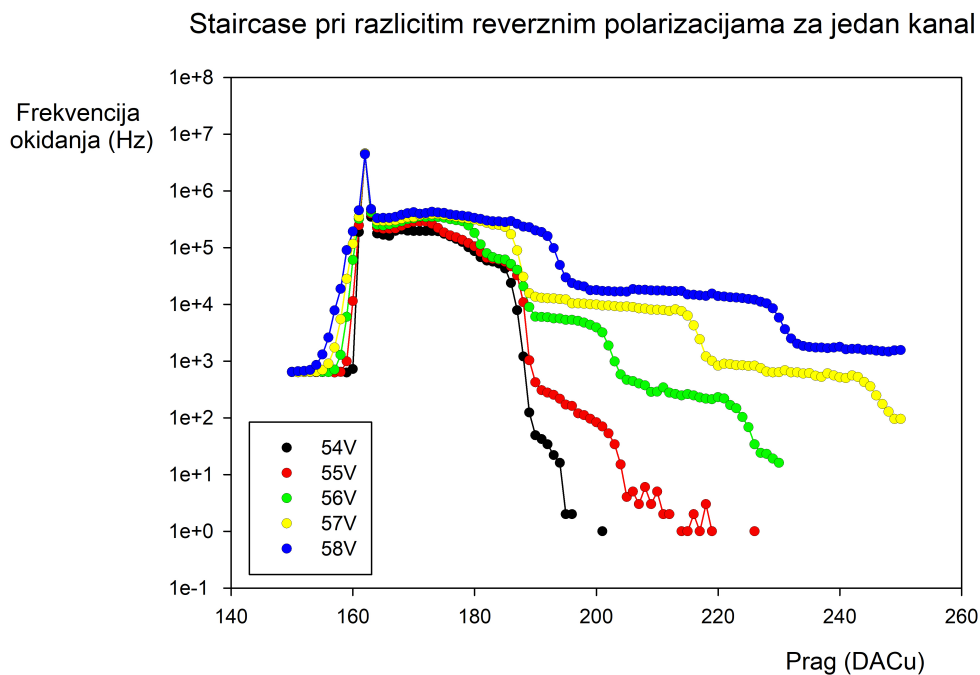
Slika 4.2: Graf mjerenja kalibracijske krivulje S curve bez spojenog SiPM modula.

Prije svega, promatrano je ponašanje sustava i razina šuma elektronike bez spojenog SiPM modula. Na slici 4.1 je prikazana staircase kalibracijska krivulja, dok je na slici 4.2 prikazana S-curve kalibracijska krivulja. Iz grafova se da naslutiti da je tzv. pedestal, razina apsolutnog šuma elektronike, na oko $180DACu$ te potom ubrzano pada.

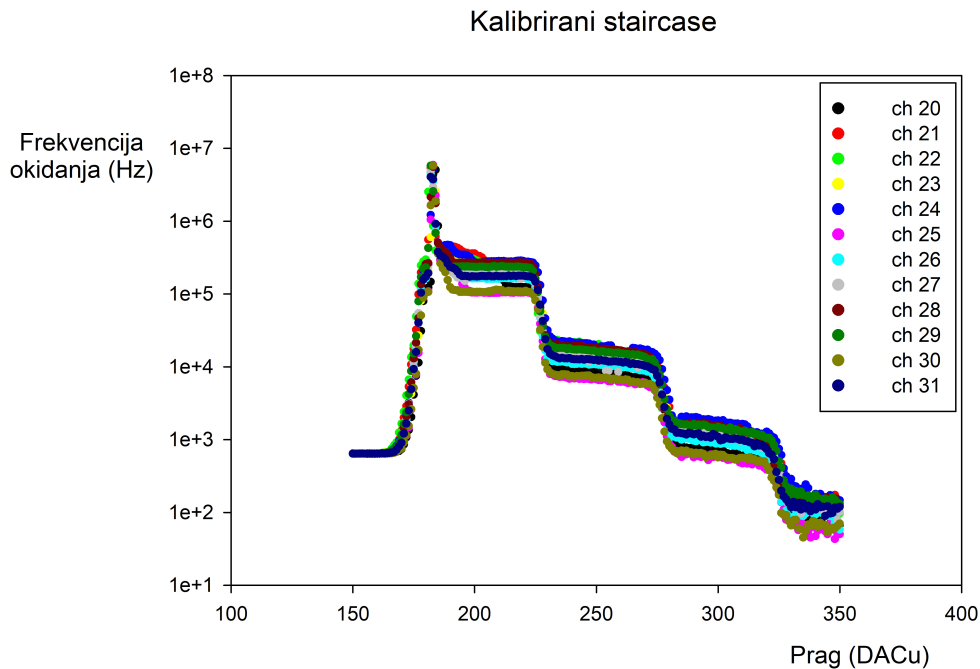
Sljedeći korak je bio spojiti SiPM modul na *Citiroc IA* pločicu, i kalibrirati SiPM čipove. U sklopu ovog rada je kalibrirano 12 od sveukupno 32 kanala, i to kanali 20 do 31 (kanali se broje od 0). Na slici 4.3 je prikazan graf kalibracijske krivulje staircase za nekalibrirane kanale 20 do 31. Kalibracija je provedena finim podešavanjem napona reverzne polarizacije na svakom SiPM kanalu pomoću slow control postavke "Input DAC", kao što je i opisano u prethodnom poglavlju. Utjecaj reverzne polarizacije je podrobnije ispitan za kanal 21 i prikazan na slici 4.4. Vidimo da se za preniski prednapon, sustav ponaša kao da SiPM modul uopće nije ni spojen, diode detektora su de facto isključene. Dovođenjem dovoljnog napona diode se uključuju, i vidimo prepoznatljiv oblik staircase krivulje. Daljnjim povećavanjem napona se krivulja širi, odnosno dioda daje viši signal za isti fotoelektron, tj. praktično više struje potekne kroz diodu prije nego što joj napon dovoljno padne da izađe iz područja proboja. Korištenjem ovog svojstva, za dvanaest kanala je istovremeno fino kalibriran prednapon kako bi imali jednak odaziv tijekom mjerenja. Rezultat kalibracije je prikazan na slici 4.5.



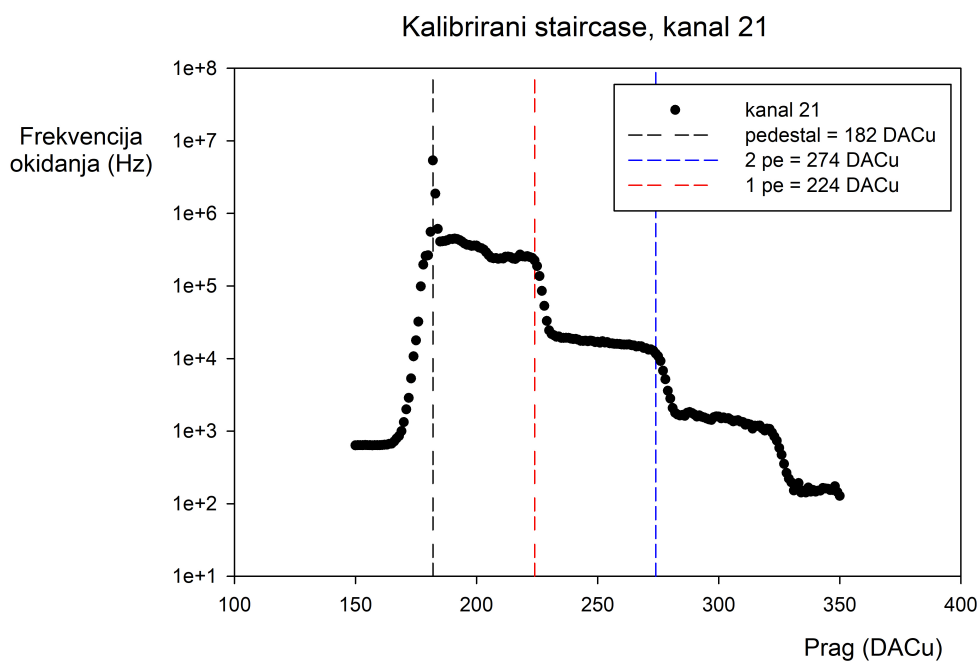
Slika 4.3: Graf mjerenja kalibracijske krivulje staircase prije kalibracije kanala.



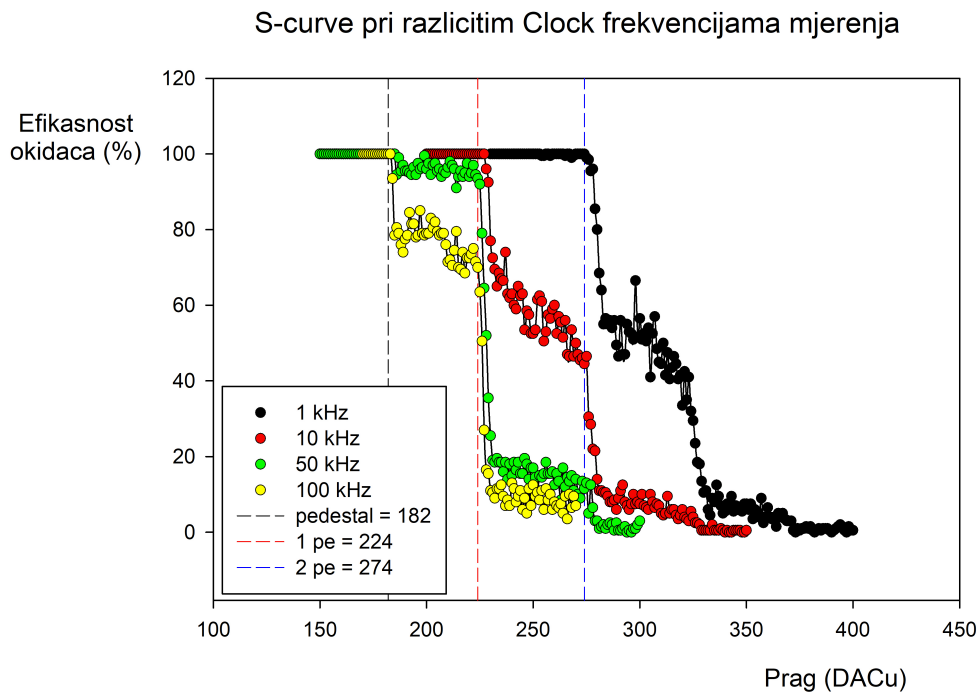
Slika 4.4: Graf mjerenja kalibracijske krivulje staircase za kanal 21 pri razlicitim vrijednostima prednapona.



Slika 4.5: Graf mjerenja kalibracijske krivulje staircase nakon kalibracije.



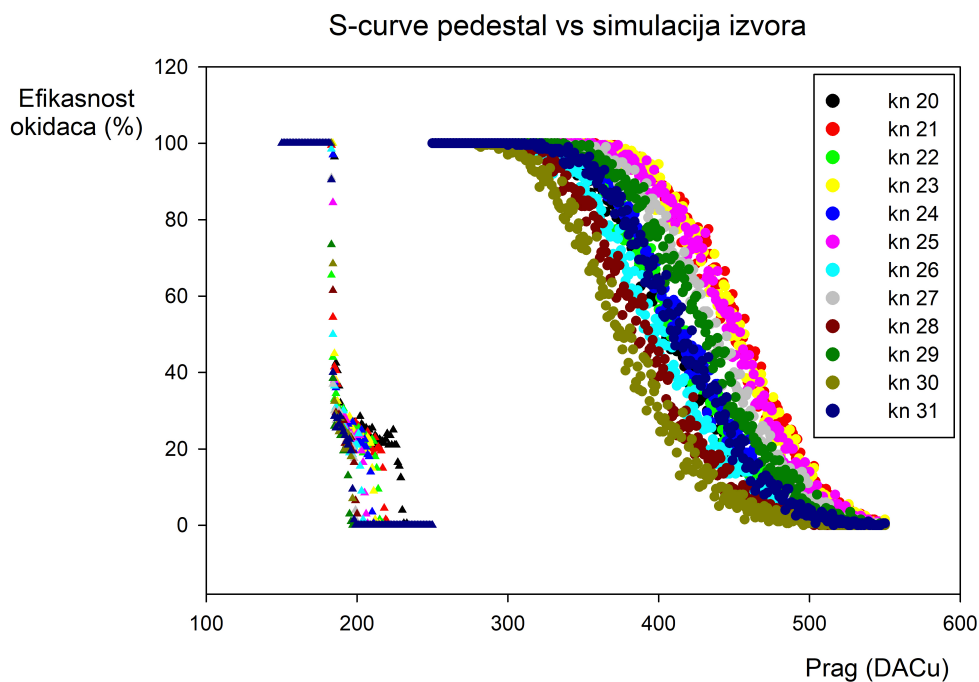
Slika 4.6: Graf mjerenja kalibracijske krivulje staircase nakon kalibracije za kanal 21, sa naznačenim razinama ključnih točaka.



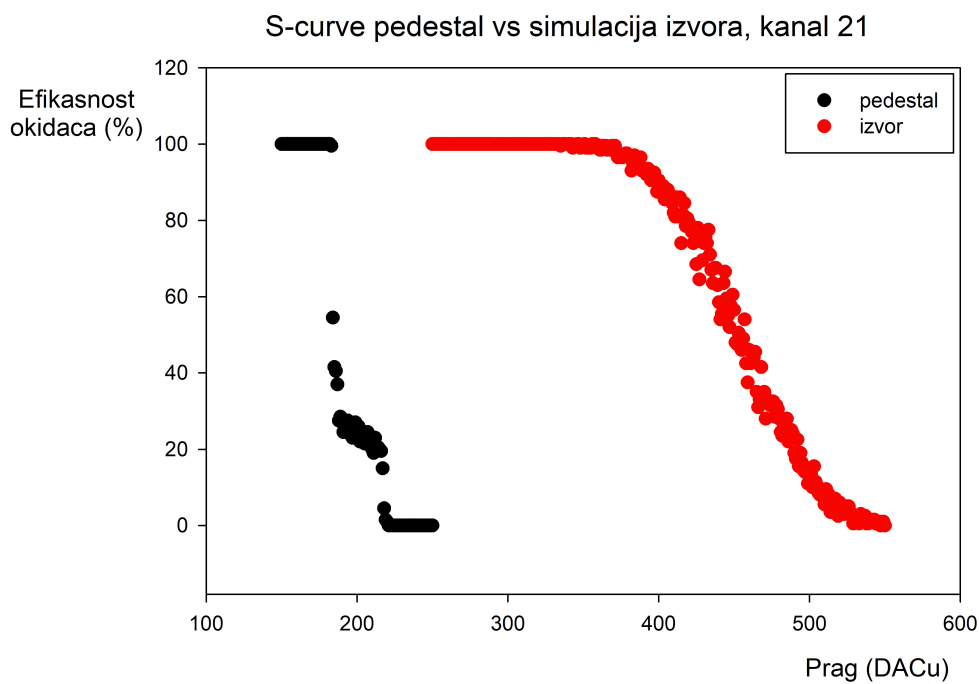
Slika 4.7: Graf mjerenja kalibracijske krivulje S curve za kanal 21 pri različitim frekvencijama sata mjerenja.

Na slici 4.6 je prikazana kalibracijska krivulja staircase samo za kalibrirani kanal 21. Na grafu su jasno naznačene razine pedestal, $182DACu$, prvog fotoelektrona, $224DACu$, i drugog fotoelektrona, $274DACu$. Na slici 4.7 je prikazana S curve kalibracijska krivulja za kanal 21, izmjerena pri različitim frekvencijama sata (*clock*) mjerenja. Na grafu su također prikazane vertikalnim pravcima razine pedestal, prvog fotoelektrona i drugog fotoelektrona. Može se uočiti da se povećanjem te frekvencije, graf translacija ulijevo. Ako je sat mjerenja sporiji, interval unutar kojeg detektiramo (vidi 3.3) signal je duži, te se manje vjerojatni događaji uvijek pojavljuju. Na grafu 4.6 se vidi da je frekvencija okidanja za pedestal $10^7 Hz$. Ako frekvenciju sata povećamo za faktor deset, onda se i vjerojatnost okidanja unutar intervala mjerenja smanjuje za isto toliko. Može se uočiti i kako je razlika manje dramatična za sat od $50kHz$ i $100kHz$. Tako da je za ovo ponašanje djelomično odgovorno i to što je većina dostupnih frekvencija mjerenja u programu potencija broja deset. Kako bi izbjegnuli ovakvo ponašanje, u narednim mjerenjima su izbjegavani signali potencije broja deset, te su kroz LED puštani pulsevi struje frekvencijom $17kHz$. Dodatno, može se još primjetiti i da su visine dark count signala semi-kvantizirane (imamo distinktno razine za jedan, dva, tri, itd. fotoelektrona), i S curve graf prati stepeničasti pad. Odnosno, ima oblik stepenice jer je zapravo superpozicija S curve kalibracijske krivulje za pedestal, jedan fotoelektron, dva fotoelektrona, tri fotoelektrona, itd.

4.2 Mjerenja sa simulacijom izvora



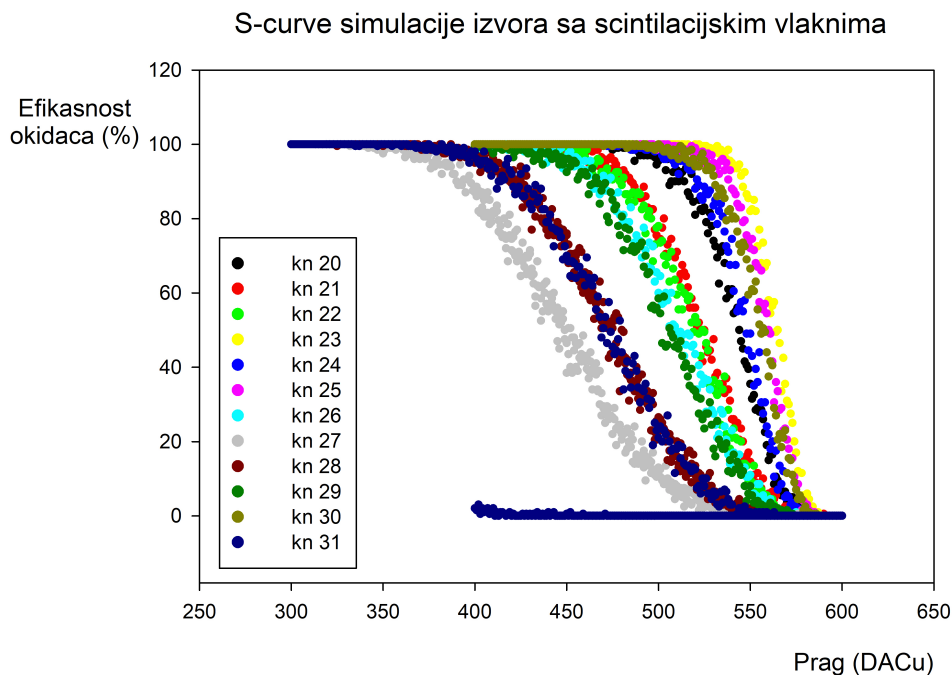
Slika 4.8: Graf mjerenja kalibracijske krivulje S curve sa simulacijom izvora u usporedbi sa mjerenjima u mraku.



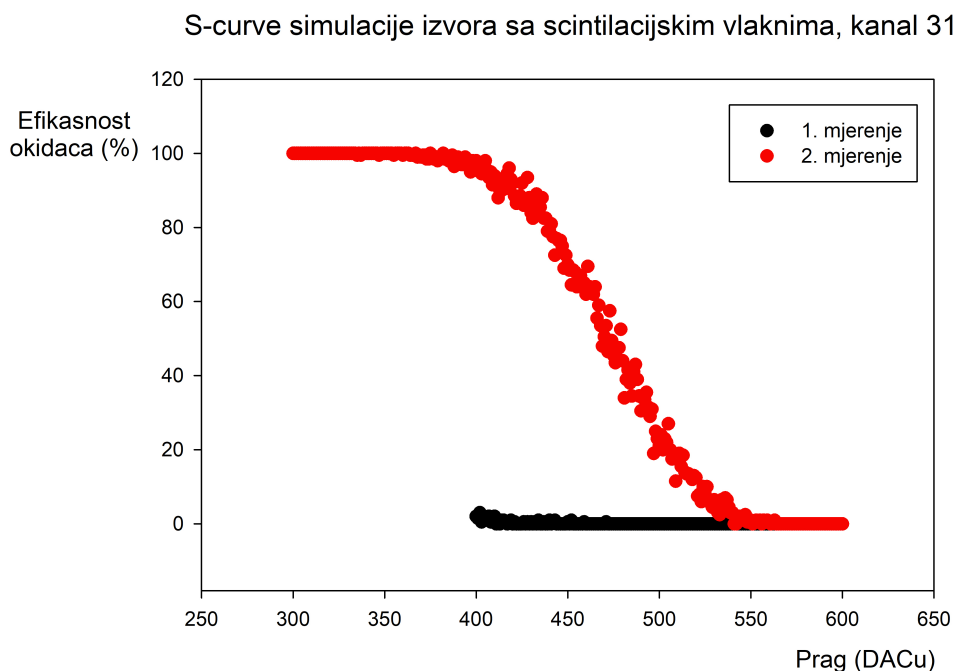
Slika 4.9: Graf mjerenja kalibracijske krivulje S curve sa simulacijom izvora u usporedbi sa mjerenjima u mraku, samo kanal 21.

Na slici 4.8 je prikazana S curve kalibracijska krivulja za simulaciju svjetlosti (desno) u usporedbi sa onom od dark count mjerenja (lijevo). Na slici 4.9, je prikazano isto mjerenje, ali samo za kanal 21, kako bi se jasnije vidjela razlika između mjerenja sa izvorom i bez. Pulsevi kroz diodu su bili namješteni tako da svaki kanal okida sa pet do sedam fotoelektrona. Može se primjetiti da, u usporedbi sa S curve krivuljom za dark count mjerenja, ona za simulaciju svjetlosti slijedi puno bliže karakterističan oblik S curve krivulje. To je zato što je signal koji odašilje LED uniforman i pobliže slijedi Gaussovu raspodjelu u visini signala. Unatoč pažljivoj kalibraciji u prethodnom koraku, i dalje vidimo rasap krivulja, odnosno varijaciju u visini signala. Glavni uzrok greške je ovdje neuniformnost LED svjetlosti koja stiže do detektora. Ovaj problem je dobrim dijelom, ali ne i u potpunosti, otklonjen korištenjem difuzera između izvora svjetlosti i detektora. No, za svaki mjereni kanal, S curve krivulja za slučaj sa simulacijom izvora je značajno desnije od onog u mraku, što znači da možemo postaviti prag dovoljno visoko da u potpunosti isključimo lažni signal i šum, a istovremeno dovoljno nisko da maksimiziramo vjerojatnost detekcije željenog signala.

4.3 Mjerenja sa simulacijom izvora i scintilacijskim vlaknima

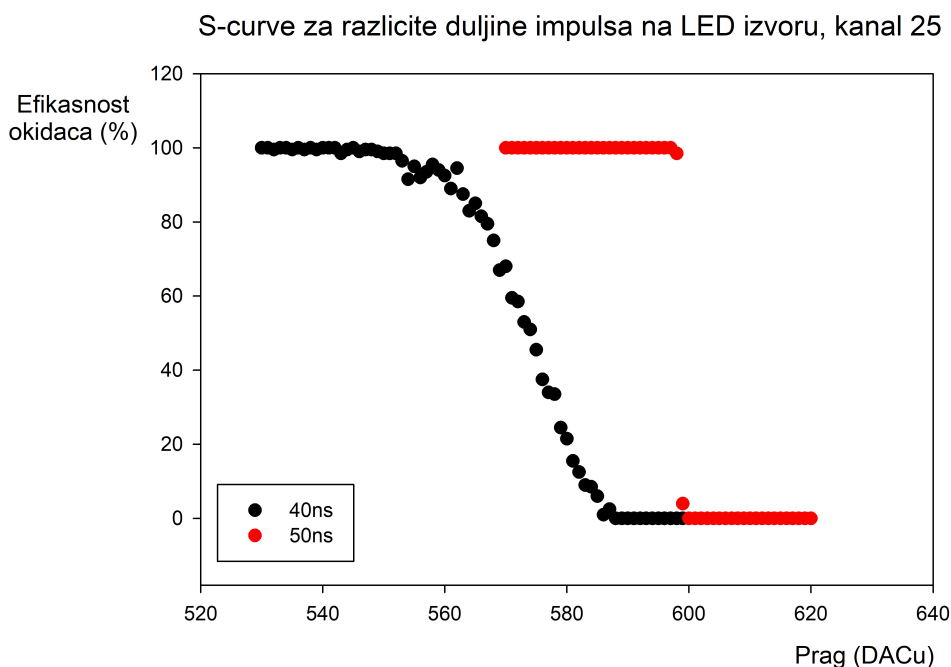


Slika 4.10: Graf mjerenja kalibracijske krivulje S curve sa simulacijom izvora i scintilacijskim vlaknima.

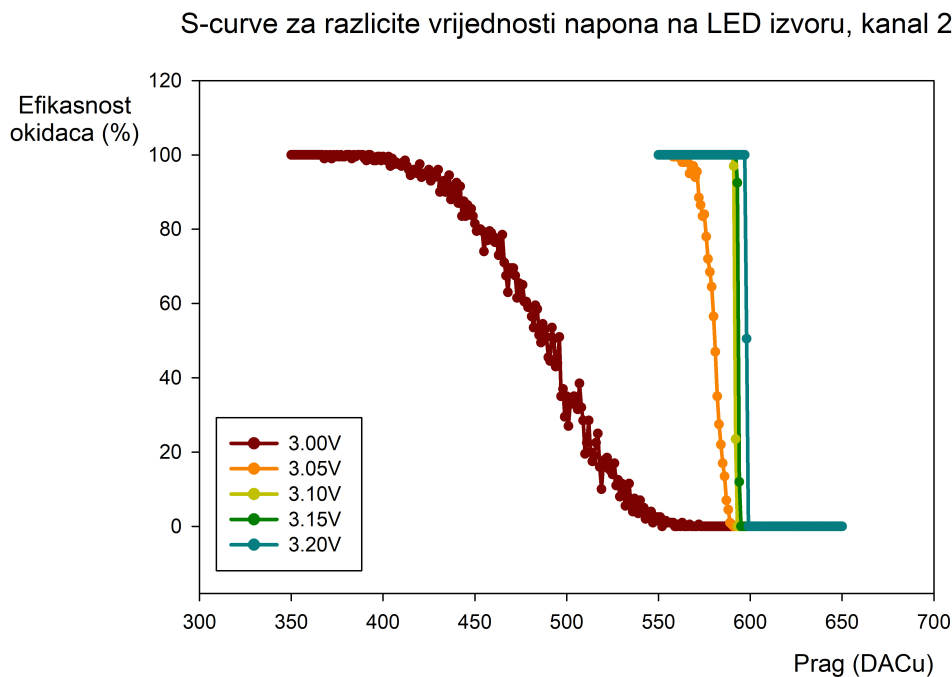


Slika 4.11: Graf mjerenja kalibracijske krivulje S curve sa simulacijom izvora i scintilacijskim vlaknima, samo kanal 31.

Na slici 4.10 su prikazana mjerenja S curve kalibracijske krivulje za kanale 20 do 31, u slučaju kada su detektori izloženi pulsirajućoj LED svjetlosti putem scintilacijskih vlakana. Mjerenja za kanal 31 su posebno prikazana na grafu 4.11. Naime, kanal 31 se tijekom svih preliminarnih mjerenja ponašao kao da nema spojeno scintilacijsko vlakno, no pri ponavljanju mjerenja na slici 4.10 sa većim intervalom vrijednosti kako bi se moglo pobliže prikazati to ponašanje, je pokazao totalno suprotan efekt, kao da ipak ima spojeno scintilacijsko vlakno. Najvjerojatniji uzrok ovom nekonzistentnom ponašanju je ili loš optički kontakt između vlakna i detektora, ili, alternativno, ukazuje na narušenu strukturu vlakna. U svakom slučaju ga je potrebno zamijeniti u budućem radu. Glavni uzrok greške u ovoj dionici mjerenja je bila neuniforma jakost LED svjetlosti, čak i nakon difuzera.



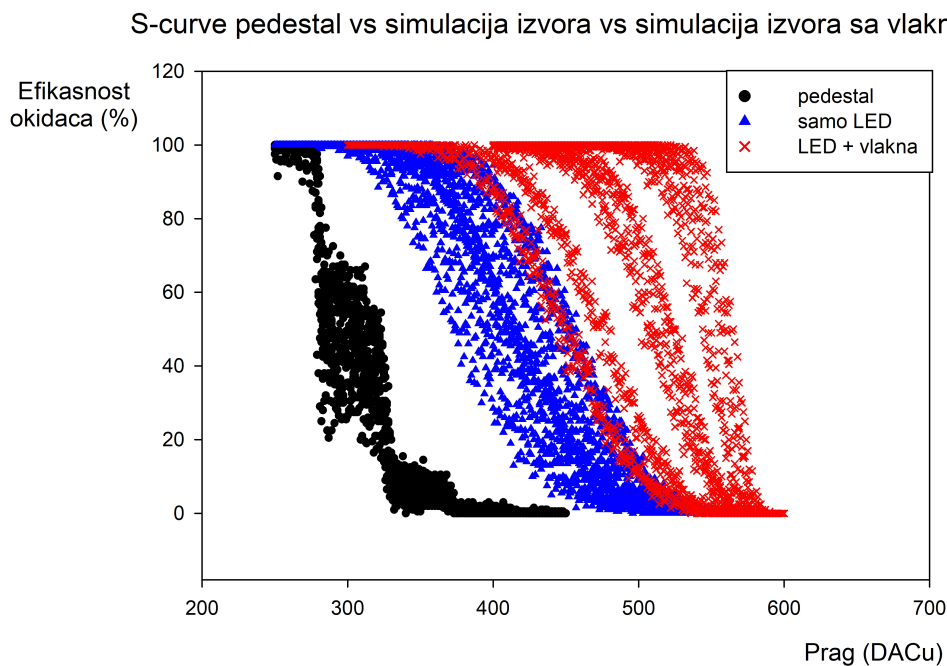
Slika 4.12: Graf mjerenja kalibracijske krivulje S curve sa simulacijom izvora i scintilacijskim vlaknima, za različite duljine impulsa na LED, samo kanal 25.



Slika 4.13: Graf mjerenja kalibracijske krivulje S curve sa simulacijom izvora i scintilacijskim vlaknima, za različite visine napona na LED, samo kanal 25.

Na slici 4.12 je prikazana S curve kalibracijska krivulja za dvije različite duljine pulsa struje kroz LED. Nažalost, zbog ograničenja korištenog izvora pulseva, nije bilo moguće namještati interval na manje od $40ns$, a sa $50ns$ se već postiže saturiranje detektora.

Stoga je mjerenje ponovljeno sa variranjem maksimalnog napona pulseva koji prolazi kroz LED, umjesto intervala pulseva. Ova mjera za jakost svjetlosti koju daje LED nije idealna, jer iako intenzitet svjetlosti raste monotono sa naponom, ta ovisnost je nelinearna. Graf tog mjerenja je prikazan na slici 4.13. Može se primjetiti da detektor veoma brzo sa porastom napona kroz LED dostiže saturaciju. Te da jednom kada je saturacija postignuta, ne možemo izmjeriti razlike u intenzitetu signala. Postoji maksimalna količina struje koja može poteći kroz diodu za dani napon. Stoga je ključno, prilikom dizajniranja detektora koji će mjeriti zrake muona, da se jakost očekivanog signala nalazi na približno 70% raspona detekcije izabranog SiPM detektora[6].



Slika 4.14: Graf mjerenja kalibracijske krivulje S curve sa simulacijom izvora i scintilacijskim vlaknima, u usporedbi sa mjerenjima samo sa simulacijom izvora i mjerenjima u mraku.

Na slici 4.14 je prikazan graf S curve kalibracijske krivulje za svih dvanaest kanala sa mjerenja u mraku, mjerenja samo sa LED izvorom svjetlosti, te mjerenja sa LED izvorom svjetlosti i scintilacijskim vlaknima. Radi preglednosti grafa, nije razlikovan svaki kanal sa vlastitom bojom, već su različitim bojama označene različite etape eksperimenta. Za potrebe ovog grafa, ponovljeno je mjerenje u mraku, za slučaj da je curenje vanjske svjetlosti u postavu sa vlaknima drugačiji. Usporedbom s grafom 4.8, može se uočiti da zaista i jest tako, najvjerojatnije zato što je postav sa vlaknima veći, i stoga ima više točaka kroz koje svjetlost može curiti. Rasap mjerenja za vlakna je također veći nego onaj samo sa LED, od ponašanja koje je ekvivalentno ne postojanju vlakana, do potpune saturacije detektora. Najveći uzrok grešaka je nekonzistentnost u ljepljenu scintilacijskih vlakana za držač, neodgovarajući optički kontakt sa SiPM detektorima, varijacije u kutu upada svjetlosti LED u vlakna, te nehomogenost svjetlosti koja dolazi do vlakana zbog nepotpune homogenizacije svjetlosti od strane difuzera. Međutim, može se svejedno uočiti da je signal znatno veći u slučaju sa scintilacijskim vlaknima, nego bez, jer odlično hvataju i provode svjetlost.

5 Zaključak

Po uzoru na rad dr. Ortega Ruiz, napravljen je prototip detektora muona. Kalibrirano je sveukupno 12 od 32 kanala detekcije, od kanala broj 20 do kanala broj 31. Kanale je bilo potrebno istovremeno kalibrirati zbog posljedica cross-talk efekta.

Karakteriziran je i izmjeren dark count šum prototipa promatranjem staircase i S-curve kalibracijskih krivulja. Pedestal mjerenja, odnosno čisti šum elektronike je, za naše postavke, bio na $182DACu$, razina jednog fotoelektrona na $224DACu$, a dva fotoelektrona na $274DACu$. Kako bi se u potpunosti isključio šum, potrebno je postaviti prag detekcije na 3.5 fotoelektrona, što je približno $400DACu$. Glavni izvor greške u ovom dijelu eksperimenta jest bilo curenje svjetlosti te neuniformnosti u parametrima detektora postignutih u tvornici.

Osim toga je ispitano ponašanje detektora u prisustvu simulacije izvora. Simulacija izvora je u našem radu bila LED dioda od $490 \pm 10nm$, što je unutar područja maksimalne osjetljivosti korištenih SiPM detektora. Ponašanje je ispitano sa i bez korištenja scintilacijskih vlakana kao svjetlovoda. Scintilacijska vlakna su bila odabrana tako da se postigne dobro poklapanje njihovog emisijskog spektra sa detekcijskim spektrom korištenih SiPMova. Za potrebu ovog dijela eksperimenta je dizajniran i izrađen poseban držač. Zaključeno je da scintilacijska vlakna značajno pospješuju detekciju fotona. Glavni izvor greške je bila neuniformnost u svjetlosti LED diode. Ova greška se minimalizirala korištenjem difuzera svjetlosti, ali problem nije u potpunosti otklonjen. On pogotovo dolazi do izražaja pri korištenju scintilacijskih vlakana kada je kvalitetan optički kontakt od presudne važnosti.

Predlažem da se u daljnjem radu kalibriraju i preostali kanali detektora, te da se provede simulacija signala sa izvorom elektrona umjesto fotona.

Želim se zahvaliti mentoru prof.dr.sc. Marin Karuza te kolegama Aldo Arena i Karlo Veličan na savjetima, uputama i produktivnoj diskusiji. Također i profesoru Giovanni Cantatore na produktivnoj diskusiji, te dr. Inaki Ortega Ruiz-u iz CERN-a koji nam je posudio testnu elektroniku.

Popis slika

1.1	Skica prototipa detektora	2
2.1	Shema SiPM čipa	4
2.2	Slika ekrana osciloskopa sa brzim i sporim izlazom	5
2.3	Shema SPAD	6
3.1	Slow control postavke tijekom mjerenja	9
3.2	Tipična staircase krivulja	10
3.3	Ilustracija principa mjerenja S curve kalibracijske krivulje	11
3.4	Usporedba S curve kalibracijske krivulje i Gaussove raspodjele razine signala	11
3.5	Slika postava za dark count mjerenja	12
3.6	Skica postava za dark count mjerenja	12
3.7	Slow control postavke prednapona	13
3.8	Slow control postavke pojačanja	14
3.9	Usporedba S curve kalibracijske krivulje i Gaussove raspodjele razine signala	15
3.10	Slika postava za mjerenja sa simulacijom izvora	16
3.11	Skica postava za mjerenja sa simulacijom izvora	16
3.12	Slika postava za mjerenja sa simulacijom izvora i scintilacijskim vlaknima	18
3.13	Grafovi odaziva SiPM čipova i vlakana na različite valne duljine	18
3.14	Slika modela držača	20
3.15	Skica modela držača	20
4.1	Staircase bez SiPM modula	21
4.2	S curve bez SiPM modula	21
4.3	Staircase prije kalibracije	22
4.4	Staircase pri različitim vrijednostima prednapona	23
4.5	Staircase poslije kalibracije	23
4.6	Staircase poslije kalibracije	24
4.7	S curve pri različitim frekvencijama sata	24
4.8	S curve sa LED vs pedestal	26
4.9	S curve sa LED vs pedestal, kanal 21	26
4.10	S curve sa LED i vlaknima	28
4.11	S curve sa LED i vlaknima, samo kanal 31	28
4.12	S curve sa LED i vlaknima, različite duljine impulsa na LED, samo kanal 25	29

4.13 S curve sa LED i vlaknima, različite visine napona na LED, samo kanal 25	30
4.14 S curve sa LED i vlaknima vs LED vs pedestal	31

Literatura

- [1] CITIROC 1A, Software & Test Bord User Guide, Weerock, 2019
- [2] Citiroc 1A Datasheet, Weerock, 2019
- [3] D.Impiombato et al., Characterisation and performance of the ASIC (CITIROC) front-end of the ASTAC camera, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment; vol 794, str. 185-192, rujan, 2015
- [4] Fast LED Light Pulses & SiPM - Physics Open Lab , 2.12.2018., <https://physicsopenlab.org/2018/12/02/fast-led-light-pulser-sipm/> , pristupjeno 23.2.2024.
- [5] I. Ortega Ruiz, Accurate Profile Measurement of the Low Intensity Secondary Beams in the CERN Experimental Areas, Ecole Polytechnique, Lausanne, 2018
- [6] AND9970/D Introduction to the Silicon Photomultiplier (SiPM), Onsemi, 2023
- [7] A. Keshavarzi et al., Muon g - 2: A review, Nuclear Physics B 975, 115675, 2022
- [8] Pulse Timing Systems, Nuclear Instrumentation: Lecture 5; predavanje; Andrew John Boston
- [9] J. Fleury et al., Petiroc and Citiroc: front-end ASICs for SiPM read-out and ToF applications, Journal of Instrumentation, vol 9, siječanj, 2014
- [10] The MUonE Project, <https://web.infn.it/MUonE/>, pristupjeno 4.4.2024.
- [11] Plastic Scintillating Fibers, katalog, Kuraray, 2014.
- [12] MPPCs for precision measurement, S13360 series, Hamamatsu, Listopad 2022.