

The Target System Development for an Electric Dipole Moment Measurement of Charged Particles at the Cooler Synchrotron COSY

Otari Javakhishvili

*The dissertation has been submitted to the Dissertation Council of
Engineering Sciences of the Agricultural University of Georgia for
the degree of Doctor of Engineering*



Supervisors:

Dr. Irakli Keshelashvili (FZJ)

Prof. Zaza Metreveli (AUG)

Agricultural University of Georgia

2022, Tbilisi, Georgia

საქართველოს აგრარული უნივერსიტეტი
სადოქტორო სკოლა
სამეცნიერო მიმართულების კომისიის რეკომენდაცია

დისერტანტი: **ოთარი ჯავახიშვილი**

დისერტაციის სათაური: “სამიზნის სისტემის პროექტირება დამუხტული ნაწილაკების ელექტრული დიპოლური მომენტის გასაზომად COSY სინქროტრონზე”
“The Target System Development for an Electric Dipole Moment Measurement of Charged Particles at the Cooler Synchrotron COSY”

დისერტაციის დაცვის თარიღი: 15 ნოემბერი 2022

დისერტაციის დაცვის კომისია:

რეცენზენტი 1:	ედიშერ ცხადაძე
რეცენზენტი 2:	რევაზ შანიძე
დაცვის კომისიის თავმჯდომარე:	ზურაბ ჯიბუტი
დაცვის კომისიის წევრი:	თამაზ ბიჭიაშვილი
დაცვის კომისიის წევრი:	ავთანდილ თავხელიძე
დაცვის კომისიის წევრი:	ზაზა მეტრეველი
დაცვის კომისიის წევრი:	ირაკლი ქეშელაშვილი

რეკომენდებულია დაცვისათვის ინჟინერიის (ავტომატიზაცია და მართვის სისტემები) სამეცნიერო მიმართულების კომისიის მიერ.

თავმჯდომარე, /აკაკი, ფაღავა/ : _____

წევრი, /ზაზა, მეტრეველი/: _____

წევრი /ზურაბ, ჯიბუტი/: _____

სადოქტორო სკოლის კოორდინატორი: _____ / ნატო, კობახიძე/

თარიღი: -----

Author's declaration

As the author of the submitted doctoral dissertation, I declare that my dissertation is an original work and that materials published, or defended by other authors in it are used in accordance with the proper citation rules.

Otari Javakhishvili
September 2022

აბსტრაქტი

ელემენტარული ნაწილაკების ელექტრული დიპოლური მომენტის ძიება ერთ-ერთი ყველაზე აქტუალური თემაა ნაწილაკების ფიზიკაში. დამუხტული ნაწილაკების (პროტონი, დეიტრონი) ელექტრული დიპოლური მომენტის გაზომვის მეთოდი არის, დამუხტული ნაწილაკების პოლარიზაციის ცვლილებაზე დაკვირვება სპეციალურ დამაგროვებელ რგოლში. მოცემული ამოცანა მოითხოვს ახალი ტიპის პოლარიმეტრს, სპეციალური სამიზნის სისტემით.

ნაწილაკების დეტექტორი შედგება ორი ფენისგან: პლასტიკური სინტილატორი და არაორგანული LYSO კრისტალის მოდულები, გამოყენებული როგორც კალორიმეტრი. ორივე სისტემა იკითხება მრავალპიქსელიანი SiPM ფოტო სენსორით. მოცემული ფოტო სენსორები მუშაობენ გაცილებით დაბალ ძაბვაზე, ვიდრე ტრადიციული ვაკუუმური ფოტო გამამრავლებლები, რაც ამარტივებს დეტექტორის კონსტრუირებას და მასთან მუშაობას. პოლარიმეტრის სრულად აწყობილი კალორიმეტრის ნაწილი წარმატებით იქნა გამოცდილი მაღალი სიჩქარის და მაღალი გარჩევადობის ADC-ს გამოყენებით. ყველა ტესტი ჩატარდა მყარი ბლოკის სამიზნის გამოყენებით.

საბოლოო პოლარიმეტრი მოიცავს ბალისტიკურ სამიზნის სისტემას, რომელიც გაისვრის მცირე ზომის ბრილიანტის გრანულას ნაწილაკების ნაკადში. გასროლის სიხშირე და სიჩქარე უნდა იყოს ცვალებადი, სასურველი ეფექტური სამიზნის სიმკვრივის მისაღებად. ამ ტიპის სამიზნე მოითხოვს სპეციალიზებულ მონიტორინგისა და კონტროლის სისტემას. ამ სამუშაოს ფარგლებში შემუშავდა გრანულოვანი სამიზნის კონცეფცია და დაპროექტდა სისტემის ძირითადი ნაწილები, როგორცაა: ზუსტი ტრიგერის, სამიზნის ტრეკირების, გადაადგილების აღდგენის და სინქრონიზაციის ფუნქციები. დაიტესტა რამდენიმე კამერა, გამოსახულების დამუშავების ალგორითმი, სხვა და სხვა სენსორები და გამამრავლებლის სქემები საუკეთესო შედეგის მისაღებად. გამოყენებულია სწრაფი კამერა, ლაზერები, ფოტოდiodები და ZynQ SoC, რომლის FPGA ნაწილი ასრულებს სწრაფი ტრიგერის, ფრენის დროის გაზომვის, კამერის ინფორმაციიდან სამიზნის დადგენის და ტრეკირების ფუნქციებს, ხოლო ჩამენებული ARM პროცესორი, გამოყენებულია კომუნიკაციისთვის. საკონტროლო სიგნალების და მონაცემების გაცვლა ხდება UART ინტერფეისით, თუმცა სამომავლოდ გამოვიყენებთ ქსელურ ინტერფეისის, რაც მოგვცემს შესაძლებლობას მოვახდინოთ სამიზნის მონაცემების სინქრონიზაცია დეტექტორში არსებულ სხვა სისტემებთან.

სამიზნო სიტყვები: 1. FPGA, 2. გრანულოვანი სამიზნე, 3. გამოსახულების დამუშავება, 4. პოლარიმეტრია

ხელმძღვანელები:

დოქტორი ირაკლი ქეშელაშვილი

პროფესორი ზაზა მეტრეველი

Abstract

The search for Electric Dipole Moment ([EDM](#)) of elementary particles is one of the hot topics in contemporary particle physics. The method to measure charged particle [EDMs](#) (proton,deuteron) is to observe the time development of a polarized beam in a dedicated storage ring (Storage Ring Electric Dipole Moment ([srEDM](#))). This requires a new polarimeter with a special target system which is under development at Cooler Synchrotron ([COSY](#))-Juelich.

The particle detector consists of two layers: a plastic scintillator for ΔE and an inorganic Lutetium–yttrium oxyorthosilicate ([LYSO](#)) crystal as a calorimeter. Both systems are read-out by multi-pixel silicon photo multiplier ([SiPM](#)) arrays. [SiPMs](#) operate at significantly lower supply voltages compared to the traditional multi-stage vacuum tubes, simplifying detector construction and operation. The developed calorimeter modules operate at voltages up to 30 Volt. The fully assembled calorimeter part of the polarimeter has been successfully tested together with its high speed and high-resolution sampling Analog to Digital Converter ([ADC](#))-based readout. All test have been carried out using solid block target. However, the final polarimeter will include a ballistic target system which will be shooting point-like diamond pellet through the beam. Frequency and speed of oscillation must be variable to achieve desired effective target density. This kind of target will require specialised monitoring and control system consisting with several electrical and mechanical parts. During this work, the concept of the pellet target and majority of the electrical and software parts has been developed, including precise triggering, object detection, track reconstruction and data synchronization units. Several cameras as well as several image processing algorithms, different types of sensors and amplifiers have been tested to get the best performance. Fast camera, lasers, photodiodes and Zynq System on Chip ([SoC](#)) are used in the system, Field Programmable Gait Array ([FPGA](#)) part is responsible for for fast trigger, Time of Flight ([TOF](#)) calculations, image processing and tracking. The ARM Central Processing Unit ([CPU](#)) is used for communications. Control signals and data are exchanged using UART interface but in future network interface will be used, which will give us ability to synchronize data of the target with other systems in detector.

Key Words 1. FPGA, 2. Pellet Target, 3. Image Processing, 4. Polarimetry

Supervisors:

Dr, Irakli Keshelashvili

Prof. Zaza Metreveli

სამიზნის სისტემის პროექტირება დამუხტული ნაწილაკების ელექტრული
დიპოლური მომენტის გასაზომად COSY სინქროტრონზე

ქართული ანოტაცია

ოთარი ჯავახიშვილი

*სადისერტაციო ნაშრომი წარდგენილია
საქართველოს აგრარული უნივერსიტეტის
ინჟინერიის სადისერტაციო საბჭოზე
ინჟინერიის დოქტორის აკადემიური ხარისხის
მოსაპოვებლად*

სამეცნიერო ხელმძღვანელი: ირაკლი ქემელაშვილი, დოქტორი

ზაზა მეტრეველი, პროფესორი

საქართველოს აგრარული უნივერსიტეტი

თბილისი, 2022

შესავალი

მიუხედავად უამრავი ექსპერიმენტისა, რომელიც დღესდღეობით ტარდება ჩვენი სამყაროს წარმოშობის და ევოლუციის შესასწავლად, ჯერ კიდევ არაფერი ვიცით მატერიასა და ანტიმატერიას შორის დამზერილ ასიმეტრიაზე. დიდი აფეთქების შემდეგ მატერია და ანტიმატერია თანაბარი რაოდენობით უნდა წარმოშობილიყო, შემდგომში მიმდინარეობდა მათი ანიჰილაციის პროცესი, თუმცა სამყაროს ევოლუციის საწყის ეტაპზე გარკვეულ მომენტში გაჩნდა მცირე ასიმეტრია, რომელიც დაახლოებით ერთ მემილიარდედს შეადგენდა (1,000,000,001 ნაწილაკი და 1,000,000,000 ანტინაწილაკი), რის შემდეგაც ანიჰილაციის პროცესში ამ ერთი ზედმეტი ნაწილაკის გამო სამყაროში დარჩა მხოლოდ მატერია - ჩვენი სამყარო. მსგავსი შედეგის მისაღებად ერთ ერთ შესაძლო მექანიზმი შეიძლება იყოს CP-სიმეტრიის დარღვევა, თუმცა სტანდარტული მოდელი (სმ), რომელიც უდიდესი წარმატებით გამოიყენება ნაწილაკების ფიზიკაში, ვერ ხსნის სამყაროში დამზერილ მატერია-ანტიმატერიის ასიმეტრიას: ამ მოდელის ფარგლებში შეფასებული სიდიდე ძალიან მცირეა იმისათვის, რომ რაოდენობრივად ახსნას არსებული ასიმეტრია.

გასული საუკუნის 60-ან წლებში ანდრეი სახაროვის მიერ ბარიოგენეზის პრობლემის ასახსნელად წამოყენებულ იქნა შემდეგი სამი პირობის ერთდროულად შესრულების ჰიპოტეზა [1]:

- სამყაროს განვითარების საწყის ეტაპზე (10^{-34} - 10^{-32} წმ დიდი აფეთქებიდან) აუცილებლად უნდა არსებულიყო გარკვეული პროცესი (ან პროცესები), რომელიც არღვევდა ბარიონული რიცხვის შენახვის კანონს;
- უნდა დარღვეულიყო სიმეტრია მუხტური შეუღლებისა (C) და მუხტურ-სივრცული (CP) კომბინირებული გარდაქმნების მიმართ, რის გამოც ბარიონებისა და ანტიბარიონების გენერაცია მოხდებოდა სხვადასხვა სიჩქარით [2];
- CPT თეორემის თანახმად ყოველი ლორენც-ინვარიანტული ლოკალური კვანტური ველის თეორია, რომელიც აღიწერება ერმიტული ჰამილტონიანით, ინვარიანტულია მუხტური შეუღლების (C), სივრცული არეკვლისა (P) და დროის შექცევის (T)

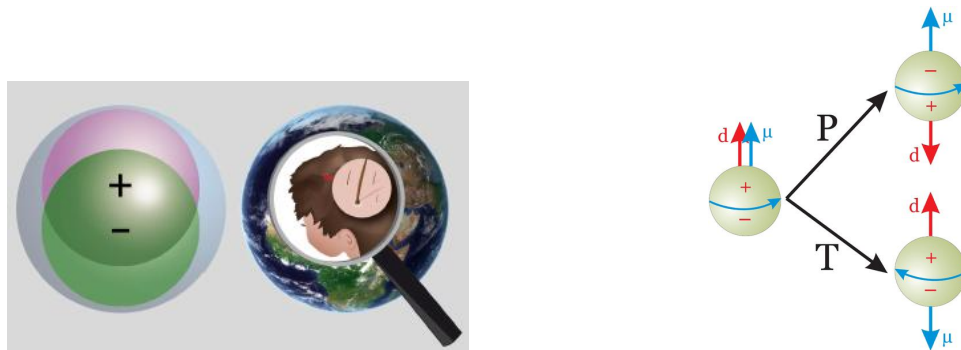
ერთდროული ოპერაციის მიმართ. რადგან ფიზიკური სისტემის მდგომარეობა თერმული წონასწორობის პირობებში დროზე არაა დამოკიდებული, CPT თეორემის თანახმად თეორია უნდა იყოს სიმეტრიული CP-ს მიმართ. ამდენად CP სიმეტრიის დარღვევა მოითხოვს, რომ ბარიონ-ანტიბარიონული ასიმეტრიის დინამიკური გენერაცია უნდა მომხდარიყო სითბური წონასწორობის დარღვევით.

ეს სამი პირობა აუცილებელია, მაგრამ არა საკმარისი ბარიოგენეზის პრობლემის გადასაჭრელად და საჭიროა მოინახოს სპეციფიკური (CP-სიმეტრიის დამრღვევი) მექანიზმები, რომლებსაც შესაძლოა ქონოდა ადგილი ბარიოგენეზის დროს. CP სიმეტრიის დარღვევა გარკვეული დონით დაშვებულია სტანდარტულ მოდელში, თუმცა, როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, ის მრავალი რიგით მცირეა იმისათვის, რომ ახსნას დღევანდელ სამყაროში არსებული ბარიონული ასიმეტრია. საჭიროა დამატებითი მექანიზმების ძიება, რაც უკვე გადის სტანდარტული მოდელის ფარგლებს მიღმა (სმმ).

დღეისათვის გამოკვეთილია სმმ პროცესების ძიების ორი სტრატეგიული მიმართულება: კვლევების წარმოება მაღალ ენერგიებზე, რომლის თვალსაჩინო მაგალითია დიდ ადრონულ კოლაიდერზე (LHC) მიმდინარე ექსპერიმენტები, და მისი ალტერნატივა ე.წ. პრეცედიული ექსპერიმენტები (ზუსტი გაზომვები) შედარებით დაბალ ენერგიებზე მოწინავე ტექნოლოგიებისა და მეთოდების გამოყენებით, რაც იძლევა გაზომვების სიზუსტის მნიშვნელოვნად გაზრდის საშუალებას. კვლევათა ასეთ ჯგუფს განეკუთვნება დამუხტული ნაწილაკების ელექტრული დიპოლური მომენტების (ედმ) ძიება ამაჩქარებლის დამაგროვებელ რგოლებზე.

ელექტრული დიპოლური მომენტი აღიძვრება იმ შემთხვევაში, თუ დადებითი და უარყოფითი მუხტების სივრცული განაწილების სიმძიმის ცენტრები არ ემთხვევა ერთმანეთს, როგორც ეს ნახ.1.ა-ზეა სქემატურად ნაჩვენები. ბუნებაში დიპოლის კარგ მაგალითს წარმოადგენს წყლის მოლეკულა, რომლისთვისაც ედმ აღძრავს მოლეკულებს შორის მიზიდულობის ძალას, რაც ნორმალურ პირობებში აიძულებს წყალს იყოს თხევად ფაზაში. პროტონისათვის მუდმივი ედმ-ის არსებობა აკრძალულია სივრცული არეკვლისა (P) და დროის შექცევის (T) სიმეტრიების არსებობის შემთხვევაში. როგორც ნახ.1.ბ-ზეა ნაჩვენები, ედმ არღვევს (P), (T) სიმეტრიებს, ხოლო CPT თეორემის

თანახმად, მუხტური შეუღლებისა და სივრცული არეკვლის მიმართ კომბინირებულ CP-სიმეტრიასაც. ნაწილაკის (ან მსუბუქი ბირთვის) არანულოვანი ედმ-ის ექსპერიმენტული დამზერა შეიძლება განხილული იქნას, როგორც მნიშვნელოვანი ნაბიჯი სამყაროს შემეცნების დღეისათვის უცნობ სფეროში, რამაც შესაძლოა ფარდა ახადოს ბარიოგენეზის პრობლემასაც, რადგან სმ-ში კობაიაში-მასკავას [3] მექანიზმის მიხედვით CP დარღვევის დაშვებული ედმ-ის მნიშვნელობა რამდენიმე რიგით მცირეა დღეისათვის არსებული გაზომვების სიზუსტეზე. ასეთი მცირე სიდიდის პირდაპირი გაზომვა რთულ ექსპერიმენტულ ამოცანას წარმოადგენს, თუმცა უახლესი ტექნოლოგიებისა და ძალიან ზუსტი მეთოდების გამოყენებით ედმ-ის ექსპერიმენტულ ძიებას დიდი პოტენციალი გააჩნია.



ნახ.1 ა) (მარცხნივ) პროტონის ელექტრული დიპოლური მომენტის სქემატური სურათი. წარმოდგენისათვის, თუ პროტონი იქნება დედამიწის ზომის, მაშინ მანძილი დადებითი და უარყოფითი მუხტების სიმბიმის ცენტრებს შორის იქნება მხოლოდ ადამიანის თმის ღერის დიამეტრის რიგის.

ბ) (მარჯვნივ) ედმ-ისათვის სივრცული არეკვლისა (P) და დროის შექცევის (T) ინვარიანტობის დარღვევის თვალსაჩინო სურათი. აქ d არის ნაწილაკის ედმ, ხოლო μ - მისი დიპოლური მაგნიტური მომენტი (მდმ).

დღემდე ედმ-ის ექსპერიმენტული შესწავლა ხდებოდა მხოლოდ ნეიტრალური სისტემებისათვის (ნეიტრონი, ატომი, მოლეკულა). დამუხტული ადრონებისათვის პირდაპირი გაზომვები ჯერჯერობით არ ჩატარებულა. ეს გამოწვეულია იმით, რომ ელექტრულ ველში, რომელიც აუცილებელია ედმ-ის გაზომვისათვის, ხდება დამუხტული ნაწილაკის აჩქარება და მისი ლოკალიზება სასრულ მოცულობაში სპეციალური მოწყობილობის გარეშე შეუძლებელია. სწორედ ასეთ მოწყობილობას

წარმოადგენს ელექტრული დამაგროვებელი რგოლი. რამდენადაც CP დარღვევის წყაროს დადგენისათვის აუცილებელია პროტონის ისე დეიტრონის ედმ-ის ძიება, სასურველია ექსპერიმენტები ჩატარდეს ერთიდაიგივე დანადგარზე. აღნიშნული ტიპის კვლევები, პოლარიზებული დეიტრონების ნაკადის გამოყენებით, უკვე დაწყებულია იულიხის კვლევითი ცენტრის COSY ამაჩქარებელზე. ამ კვლევებში ქართული ჯგუფიც აქტიურადაა ჩართული.

იულიხში დაგეგმილი ექსპერიმენტების მეთოდოლოგია თავისთავად წარმოადგენს სიახლეს. იგი დამყარებულია ამაჩქარებლის დამაგროვებელ რგოლში მოძრავი დამუხტული ნაწილაკების მაგნიტური და ელექტრული დიპოლური მომენტებით გამოწვეული სპინის პრეცეზიაზე დაკვირვებაზე გარეშე ელექტრულ და მაგნიტურ ველებში (ნახ.2.ა). როგორც ცნობილია, ნაწილაკის სპინით განპირობებული მაგნიტური მომენტი ურთიერთქმედებს მაგნიტურ ველთან და სპინი იწყებს პრეცესიას მაგნიტური ველის დამახულობის ვექტორის გარშემო. ანალოგიურად, თუ ნაწილაკს გააჩნია არანულოვანი ედმ, რომელიც სპინის კოლინიარული უნდა იყოს, ის ურთიერთქმედებს ელექტრულ ველთან და სპინი დამატებით იწყებს პრეცესიას ელექტრული ველის დამახულობის ვექტორის გარშემო. სპინის ორიენტაციის ცვლილება დროში შესაძლებელია დაფიქსირდეს სპეციალური მოწყობილობის - პოლარიმეტრის დახმარებით.

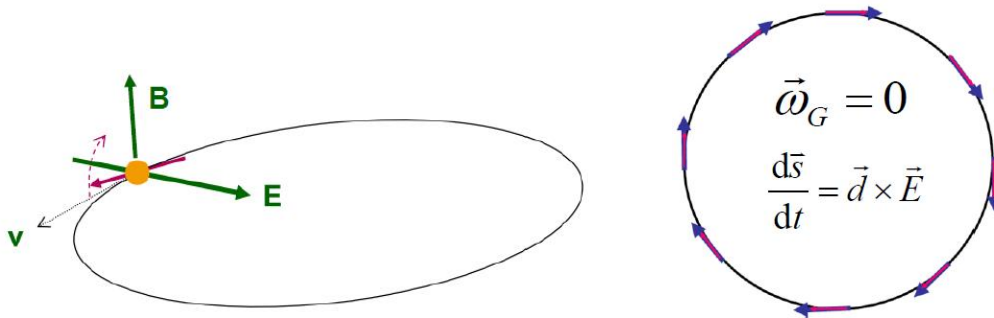
ნაწილაკის ელექტრული დიპოლური მომენტითა (ედმ) და მაგნიტური დიპოლური მომენტით (მდმ) გამოწვეული სპინის ვექტორის მოძრაობა (პრეცესია) ელექტრულ (\vec{E}) და მაგნიტურ ველებში (\vec{B}) აღიწერება ე.წ. თომას-ბერგმან-მიშელ-ტელეგდის (Thomas BMT) განტოლებით [4]:

$$\frac{d\vec{s}}{dt} = \vec{s} (\vec{\Omega}_{MDM} + \vec{\Omega}_{EDM}),$$

$$\vec{\Omega}_{MDM} = \frac{q}{m} G\vec{B} - \frac{\gamma G}{\gamma + 1} \vec{\beta}(\vec{\beta} \cdot \vec{B}) - G - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \frac{\vec{\beta} \cdot \vec{E}}{c},$$

$$\vec{\Omega}_{EDM} = \frac{\eta q}{2mc} \vec{E} - \frac{\gamma}{\gamma + 1} \vec{\beta}(\vec{\beta} \cdot \vec{E}) + c\vec{\beta} \cdot \vec{B}.$$

(\vec{E} და ლორენცის ცვლადებია, G - მაგნიტური ანომალური მომენტი; m, q - ნაწილაკის მასა და მუხტი, c სინათლის სიჩქარე, γ კი ედმ-თან დაკავშირებული სიდიდეა). ამ განტოლებაში კუთხური სიჩქარე (Ω) განსაზღვრულია ულტრა-ნაწილაკის იმპულსის ვექტორის მიმართ. მდმ-ით გამოწვეული სპინის პრეცესია რამოდენიმე რიგით აღემატება ედმ-ით გამოწვეულ პრეცესიის სიხშირეს. ამიტომ, ელექტრული და მაგნიტური ველების კონფიგურაცია ისე უნდა შეირჩეს, რომ მდმ-ის წვლილი სპინის პრეცესიაში გაქრეს. თუ დამაგროვებელ რგოლში ნაწილაკთა მოძრაობისას შევქმნით ისეთ პირობებს, რომ სპინის მიმართულება ყოველთვის ნაწილაკის მოძრაობის მიმართულების თანხვედრილი იქნება (მაგნიტური ველის დამაბულობა $\vec{B} = 0$ და $G = 1/(\gamma^2 - 1)$), რასაც სხვანაირად სპინის “გაყინვას” უწოდებენ), შეწყდება ანომალური მაგნიტური მომენტით გამოწვეული სპინის პრეცესია (ნახ.2.ბ). ასეთ პირობებში ნაწილაკების პოლარიზაციის ვერტიკალური მდგენელის გაჩენა იქნება ნაწილაკის ედმ-ის არსებობის დამადასტურებელი.

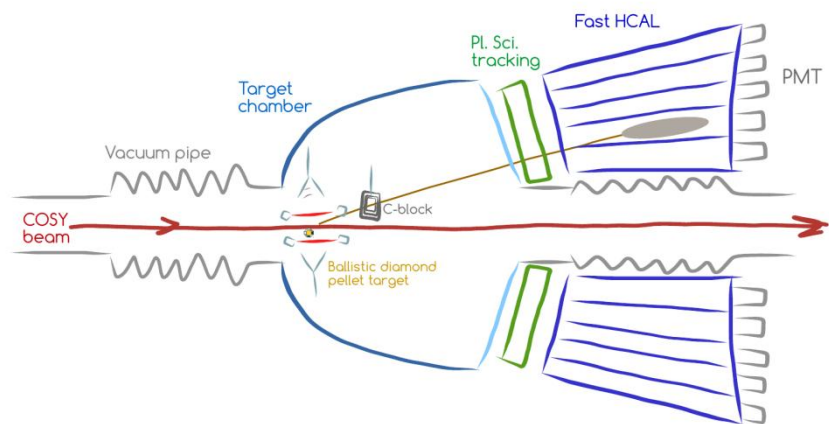


ნახ.2 ა) (მარცხნივ) ედმ გაზომვის პრონციპი: რადიალურ ელექტრულ ველში ნაწილაკზე მოქმედებს ამაჩქარებლის (ორბიტის) სიბრტყის მართობული ძალის მომენტი;
 ბ) (მარჯვნივ) ე.წ. „სპინის გაყინვა“ დამაგროვებელ რგოლში: ნაწილაკის სპინ (წითელი ისარი) ყოველთვის მისი სიჩქარის მიმართულების (ლურჯი ისარი) თანხვედრილია.

ედმ-ის არსებობის შემთხვევაში ნაკადის დამუხტული ნაწილაკის სპინზე ელექტრული ველი იმოქმედებს ძალის მომენტით, რომელიც ნელ-ნელა შეატრიალებს სპინს ამაჩქარებლის სიბრტყიდან ვერტიკალურ სიბრტყეში, როგორც ეს ნახ.2ა-ზეა

ნაჩვენები. ნაკადის ვერტიკალური პოლარიზაციის ასეთი ცვლილების დამზერა მოხდება ნაკადის ნახშირბადის სამიზნეზე დრეკადი გაბნევის პროცესში გაბნეული ნაკადის ნაწილაკების მზარდი მარცხენა-მარჯვენა ასიმეტრიის გაზომვით. ედმ-ის $10^{-29} e \cdot cm$ მნიშვნელობისათვის ელექტრული ველის 10 მგვ/მ დამაბულობის შემთხვევაში სპინის ორიენტაციის ცვლილება მოხდება $3 \cdot 10^{-9}$ რადიანი/წმ კუთხური სიჩქარით. ამ ტიპის გაზომვები მოითხოვს ისეთ მგრძნობიარობას, როგორც აქამდე მიღწეული არ ყოფილა დამაგროვებელ რგოლებზე. ამ შემთხვევაში სტატისტიკურად საიმედო შედეგის მისაღებად საჭირო იქნება დამაგროვებელი რგოლის ნაკადით თითოეული შევსების გაზომვა გაგრძელდეს დაახლოებით 1000 წმ-ის განმავლობაში, რათა ვერტიკალური პოლარიზაციით გამოწვეული ასიმეტრიის გაზომვის სიზუსტემ მიაღწიოს 10^{-6} დონეს, რომლის გაზომვაც უკვე შესაძლებელი იქნება შესაბამისი მოწყობილობის - JEDI Polarimeter (JePo) პოლარიმეტრის საშუალებით.

პოლარიმეტრის კონცეპტუალური იდეა [5], რომელიც შემოთავაზებული იყო ქართული ჯგუფის მიერ, ნაჩვენებია ნახ.3-ზე. პოლარიმეტრი ახდენს ნაკადის პოლარიზაციის უწყვეტ მონიტორინგს, რომლის დროს ხდება დრეკადი გაბნევის პროცესში ასიმეტრიის დიდი სიზუსტით გაზომვა. პოლარიმეტრის მუშაობის პრინციპი დამყარებულია დრეკად dC ურთიერთქმედებაში გაბნეული დეიტრონის სრული ენერგიის გაზომვაზე. ეს მეთოდი მოითხოვს (i) დრეკადი რეაქციის იდენტიფიცირებას, (ii) თითქმის 100%-იან ეფექტურობას, (iii) ასევე მაქსიმალური მგრძნობიარობის არის თითქმის სრულ გადაფარვას, (iv) ამ არეში არ უნდა იყოს მაგნიტური ან ელექტრული ველები, და (v) სტაბილურობას ხანგრძლივი დროის განმავლობაში (≥ 10 წელი).



ნახ.3 პოლარიმეტრის სქემატური სურათი

JePo დეტექტორის მთავარ კომპონენტს წარმოადგენს ადრონული კალორიმეტრი, რომელიც გამოიყენება პროტონების და დეიტრონების ენერგიის გასაზომად და იმპულსის მიმართულების შესაფასებლად. ეს არის ახალი ტიპის დეტექტორი, რომელიც იყენებს LYSO არაორგანულ სცინტილატორებს, მოდულურ დიზაინს და მაღალეფექტურ SiPM ფოტოგამამრავლებლის მოდულებს. ანალოგური სიგნალის გარდაქმნა ციფრულში მოხდება სწრაფი (მყისიერი) ანალოგურ-ციფრული გარდამქმნელების გამოყენებით. მას შეუძლია გაზომოს ნაწილაკების ენერგია, რომელიც წარმოიქმნება ნაწილაკების (დეიტრონი, პროტონი) სამიზნეზე (ნახშირბადზე) ურთიერთქმედების პროცესში. ამ ტიპის დეტექტორის უპირატესობა არის, ძლიერ მაგნიტურ და ელექტრულ ველებში მუშაობის შესაძლებლობა, აქვს ძალიან მაღალი დეტექტირების და მონაცემთა შეგროვების ეფექტურობა, ასევე მოკლე და გრძელვადიანი სტაბილურობა. კოორდინატული გარჩევისუნარიანობის გასაუმჯობესებლად კალორიმეტრის წინ დამატებით მოთავსებულია პლასტიკური სცინტილატორისგან დამზადებული ჰოდოსკოპი.

გარდა დეტექტორისა, პოლარიმეტრის მნიშვნელოვანი ელემენტია სამიზნე, რომელიც უნდა მოთავსდეს წრეზე ცირკულირებადი ნაწილაკების ნაკადში. სამიზნისადმი წაყენებული ძირითადი მოთხოვნებია: ნაკადის პარამეტრებზე მინიმალური გავლენა; ნაკადის მინიმალური ენერგეტიკული დანაკარგები ნაკადის დამუხტული ნაწილაკების სამიზნეში გავლისას; მინიმალური ელექტრული და

მაგნიტური ველები სამიზნის არეში. სამიზნეზე წაყენებული მოთხოვნებიდან და EDM-ის გაზომვის სირთულიდან გამომდინარე, შესაბამისი სამიზნის შექმნა მოითხოვს თანამედროვე ტექნოლოგიების გამოყენებას რამდენიმე მიმართულებით (ელექტრო და მექანიკური ინჟინერიის, პროგრამული უზრუნველყოფის და ა.შ.). სადისერტაციო ნაშრომი ძირითადად ეხება პროექტის აპარატურულ და პროგრამულ მხარეებს, რადგან მექანიკური ნაწილი ჯერ კიდევ შემუშავების ფაზაშია.

ახალი ბალისტიკური სამიზნის კონცეფცია, რომელიც შეიქმნა დისერტაციაზე მუშაობის პროცესში, იყენებს სხვადასხვა ზომის ნახშირბადის გრანულებს. იგი წარმოადგენს რთულ საინჟინრო მოწყობილობას, რომელიც აღჭურვილი იქნება ნახშირბადის მცირე ზომის (10-100 μm) მარცვლების სასროლ-დამჭერი მექანიზმით, რომელიც მარცვლებს გაისვრის ნაკადის გამჭოლად და დაიჭერს მათ საპირისპირო მხარეს. ეს საშუალებას მოგვცემს ჩავატაროთ ექსპერიმენტები ამაჩქარებლის ნაკადის მინიმალური დანაკარგებით, საჭიროებისამებრ მოვახდინოთ სამიზნის ჩართვა/გამორთვა, და, რაც ყველაზე მნიშვნელოვანია, შევისწავლოთ ნაკადის პალარიზაციის პროფილი.

სამიზნე სისტემის კონცეფციის განსახორციელებლად, როგორც საინჟინრო ამოცანა, პროექტი დაყოფილია რამდენიმე ძირითად ნაწილად:

1. სისტემის მუშაობისთვის საჭიროა სათანადო ტექნიკური პლატფორმის მოძიება, რომელსაც ექნება საკმარისი ოპერატიული სიმძლავრე. ვინაიდან საჭიროა მაღალი სიჩქარის კამერა, სწრაფი ტრიგერის და დროის გაზომვის სისტემები, მსგავსი ამოცანისთვის საუკეთესო მიდგომა იქნება FPGA + CPU.

2. TOF და ტრიგერის სისტემის სქემის პროექტირება და შექმნა, რომელიც შედგება სპეციალური ბეჭდური დაფისგან (PCB), მაღალი სტაბილურობის, ზუსტი, მაღალი გამძლეობის მქონე გამამლიერებლისგან და სიგნალის ფორმირების სქემისგან, რომლებიც საჭიროა ზუსტი ტრიგერის და TOF გაზომვებისთვის. უფრო კონკრეტულად:

- სენსორის და ლაზერის შერჩევა და მათი ტესტირება. სენსორების მრავალფეროვნებიდან გამომდინარე, რომლებსაც აქვთ განსხვავებული მახასიათებლები, საჭიროა შეირჩეს შესაბამისი სენსორი. ასევე, უნდა

ჩატარდეს ტესტები სენსორისა და მისი თანმხლები ლაზერის შესარჩევად, რადგან სენსორების მგრძობელობა დამოკიდებულია სინათლის ტალღის სიგრძეზე;

- TOF-სთვის PCB-ის შემუშავება გარკვეულწილად რთული ამოცანაა, რადგან მისი საშუალებით შესაძლებელი უნდა იყოს დაბალი ამპლიტუდის მქონე სიგნალის დეტექტირება და მისი ხმაურის დონიდან გამორჩევა, მაღალი სტაბილურობა დიდი გაძლიერების კოეფიციენტის პირობებში, ფილტრაცია და ანალოგური სიგნალის შესაბამის ციფრულ სიგნალში გადაყვანა.
- მარტივი მექანიკა TOF სისტემის შესამოწმებლად PCB-ის შექმნის შემდეგ, რათა დარწმუნდეთ, რომ ყველაფერი კარგად მუშაობს. გამაძლიერებელს შეუძლია გაუმკლავდეს დაბალ სიგნალს და არ არის ხმაური გამოსავალზე.

3. FPGA სისტემის შემუშავება, რომელიც მოიცავს:

- სპეციალური ბლოკის (IP) შემუშავება ობიექტების აღმოჩენისთვის, რომელსაც ექნება სათანადო ალგორითმები ობიექტების აღმოჩენისთვის, შეძლებს კამერის მიერ მოწვდილ ინფორმაციაში სამიზნის გამორჩევას ფონიდან და განსაზღვრავს ობიექტის კიდეებს შემდგომი დამუშავებისთვის;
- სპეციალიზირებული ბლოკის (IP) შექმნა ობიექტის გადაადგილების დასადგენად. გამოსახულებაში კიდეების აღმოჩენის შემდეგ, სისტემებს უნდა შეეძლოს სამიზნის ტრაექტორიის კოორდინატების დადგენა.
- სპეციალიზირებული ბლოკის (IP) შექმნა TOF სისტემისთვის. საწყის და საბოლოო ტრიგერის სიგნალების აპარატურულ დონეზე დეტექტირების შემდეგ საჭიროა მათ შორის დროის ინტერვალის გაზომვა. ტრიგერების ინფორმაცია გადაეცემა FPGA-ს და ხდება მათ შორის დროის ინტერვალის დათვლა, რის საფუძველზეც შეგვიძლია სამიზნის სიჩქარის გამოთვლა.
- FPGA ბლოკ-დიზაინის შემუშავება ტესტებისთვის: კამერის სიგნალების გადაცემა დამუშავების სისტემაში და შემდეგ დამუშავებული ინფორმაციის

გადაცემა მაღალი გარჩევადობის მულტიმედიური ინტერფეისის (HDMI) ეკრანზე ან სიმულირებული სიგნალების სტრიმინგი კომპიუტერიდან HDMI-ის მეშვეობით, დამუშავება და დამუშავებული მონაცემების გატანა HDMI ეკრანზე; ტესტირებისთვის ასევე საჭიროა შეიქმნას ვიდეო დამუშავების სისტემა FPGA-ში, სადაც კამერის ნაკადის გვერდის ავლით, სისტემას წინასწარ დაგენერირებული, სიმულირებული გამოსახულება მიეწოდება HDMI-ს საშუალებით. ეს საშუალებას მოგვცემს სრულფასოვნად შევისწავლოთ ვიდეო გამოსახულების დამუშავების სისტემა.

4. პროცესორის პროგრამული უზრუნველყოფის შემუშავება, რათა შეძლოს გარე სისტემებთან კომუნიკაცია, კონტროლი და ინფორმაციის მიმოცვლა დეტექტორის სხვა სისტემებთან. უნდა შეიქმნას შესაბამისი დრაივერები სხვადასხვა ნაწილებისთვის, როგორცაა:

- ობიექტის დეტექტირების სისტემა;
- ობიექტის გადაადგილების - ტრეკირების სისტემა;
- TOF და ტრიგერის სისტემა;
- პროცესორის პროგრამული უზრუნველყოფა კომუნიკაციისთვის და მონაცემთა მიმოცვლისთვის.

5. სისტემის ინტეგრაცია მთელ დეტექტორთან.

ავტორი თითქმის თავიდანვე იყო ჩართული JePo-ს შექმნისა და განვითარების პროცესში, მონაწილეობდა დეტექტორის მოდულების და ზოგიერთი სხვა მექანიკური ნაწილის აწყობაში. მან ასევე შეიმუშავა მრავალარხიანი კვების ბლოკის მონიტორინგის სისტემა [6]. დისერტანტი ასევე მუშაობდა კვების ბლოკის სისტემის გაუმჯობესებაზე. მან ასევე შექმნა მყარი სამიზნის კონტროლის პროგრამული უზრუნველყოფა გრაფიკული ინტერფეისით (GUI) WASA (Wide Angle Shower Apparatus) დეტექტორისთვის და რვა არხიანი ტრიგერის სისტემა RF-WIEN ფილტრისთვის შესაბამისი გრაფიკული ინტერფეისით (GUI).

დეტექტორის პროექტირებისას გამოყენებული იყო COSY ამაჩქარებლის გარე საექსპერიმენტო დარბაზი. გამოიცადა სხვადასხვა ტიპის სამიზნე და მათგან არჩეული იქნა ნახშირბადის სამიზნე უკეთესი ანალიზირების უნარის გამო [5]. ამ ექსპერიმენტებში ნაწილაკების ნაკადი პირდაპირ ეცემოდა სამიზნეს. მოგვიანებით დეტექტორი ჩაიდგა ამაჩქარებლის რგოლში. ამ შემთხვევაში სამიზნეს მუდმივად ვერ გავაჩერებთ ნაწილაკების ნაკადში, რადგან ნაკადის აჩქარების მომენტში მისი განივი ზომები დიდია და სამიზნე ხელს შეუშლის აჩქარების პროცესს. საჭიროა მოძრავი სამიზნე, რათა შევძლოთ მისი ნაკადთან ახლოს მიყვანა და გამოყვანა. პირველი ამოცანა იყო მყარი ბლოკური სამიზნის კონტროლის სისტემის შემუშავება, რომელიც ამჟამად გამოიყენება ექსპერიმენტებში. ავტორმა პარალელურად დაიწყო გრანულოვანი სამიზნე სისტემის ნაწილების პროექტირება, როგორცაა TOF მოდული, მისი PCB და მასთან დაკავშირებული IP. TOF-ის დასრულების შემდეგ მუშაობა კონცენტრირებული იყო ვიდეო კამერის დიზაინის იმპლემენტაციაზე FPGA-ში, ვიდე გამოსახულების დამუშავებასა და ობიექტის ტრეკირების სისტემაზე.

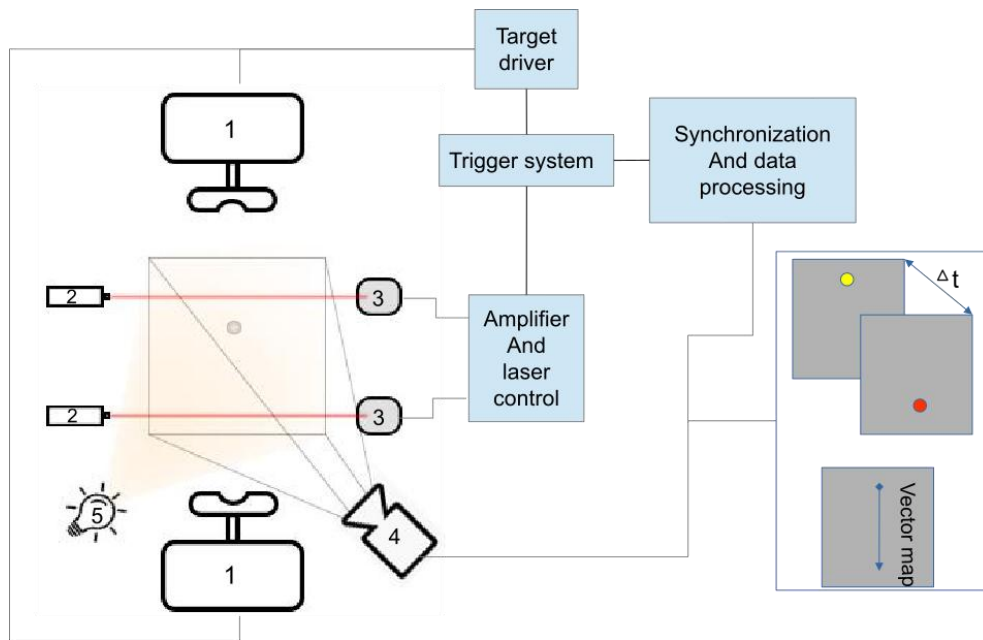
ბალისტიკური გრანულოვანი სამიზნის კონცეფცია

პოლარიმეტრის ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი ნაწილია სამიზნე სისტემა. მაღალი ენერგიების ფიზიკის ექსპერიმენტებში გამოიყენება სამიზნეების მრავალი სახეობა, როგორცაა მყარი, თხევადი, აირის და ყინულის გრანულების სამიზნეები. srEDM გაზომვებში სამიზნის ძირითადი მოთხოვნებია მინიმალური გავლენა ნაწილაკების ნაკადზე და ამაჩქარებლის ვაკუუმურ სისტემაზე. ტრადიციული სამიზნე სისტემების უმეტესობა არ გამოდგება srEDM ექსპერიმენტისთვის, რადგან ზოგიერთ სამიზნეს ან არ შეუძლია ნახშირბადის გამოყენება, ან მნიშვნელოვნად აუარესებს ვაკუუმის პირობებს, ან აქვთ ძალიან მაღალი სიმკვრივე.

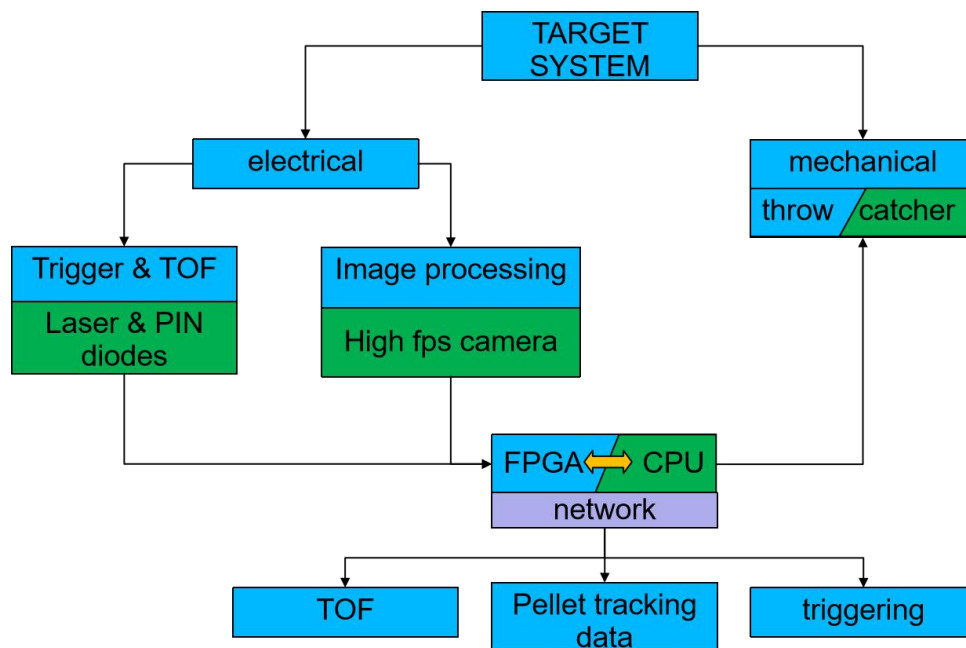
JePo დეტექტორის არსებულ კონფიგურაციაში გამოიყენება ჰორიზონტალური და ვერტიკალური ნახშირბადის მყარი ბლოკის ტიპის სამიზნეები. ისინი დამონტაჟებულია ხაზოვან ბიჯურ ამძრავებზე. სამიზნის მართვის სისტემა ეფუძნება ინფორმაციის მიმოცვლის სისტემა (Experimental Physics and Industrial Control System) EPICS-ს [7]. ამიტომ, მასზე წვდომა შესაძლებელია დისტანციური კომპიუტერიდან, რომელიც მუშაობს სპეციალური გრაფიკული პროგრამული უზრუნველყოფის საშუალებით. EPICS ინტეგრაცია ჩვენს სისტემაში საშუალებას გვაძლევს დავაყენოთ სამიზნის ოპტიმალური პოზიცია ხელით ან ავტომატურად მონაცემთა წამკითხველი სისტემის და ამაჩქარებლის სხვადასხვა ცვლადების მონიტორინგით და შესაბამისად სამიზნის პოზიციის კორექტირებით. არსებობს უსაფრთხოების მიზნით შექმნილი პროგრამული და ტექნიკური სისტემები სისტემები, რომლებიც წყვეტენ ძრავებზე ელექტროენერგის მიწოდებას და გამორიცხავენ ორივე სამიზნის ერთდროულად მოძრაობას და შემთხვევით შეჯახებას. ამ ტიპის სამიზნე მოითხოვს ნაწილაკების ნაკადის დამატებით აღზუნებას, რათა ნაკადის ნაწილაკების მხოლოდ მცირე ნაწილი მოხვდეს სამიზნეს. შეიძლება გამოყენებულ იქნას მავთულის სამიზნე ძალიან თხელი ნახშირბადის მავთულით, მაგრამ მავთულის სიმკვრივე მაინც ძალიან მაღალი იქნება, რაც გამოიწვევს დიდ დანაკარგებს ნაწილაკების ნაკადში და შეამცირებს გაზომვის ხანგრძლივობას.

სხვა და სხვა ნაკლოვანებების გათვალისწინებით, შევიმუშავეთ ნახშირბადის ბალისტიკური გრანულების სამიზნის ახალი კონცეფცია. იდეა არის პატარა ნახშირბადის გრანულის ნაწილაკების ნაკადში ოსცილირება. სამიზნის სისტემა შედგება ორი მექანიზმისგან რომლებსაც შეუძლიათ ისროლონ ან დაიჭირონ მცირე, 10 - 100 მიკრონის ზომის გრანულა. გრანულის გადაადგილების ზუსტი მონიტორინგით, კონტროლით და მისი მონაცემთა ანალიზის სისტემაში ინტეგრირებით შეგვეძლება ნაკადის პროფილის სკანირებაც კი. სამიზნის სისტემას უნდა შეეძლოს გასროლა-დაჭერის ციკლის სიხშირის ცვლილება, სამიზნის გასროლის სიჩქარის კორექტირება, კონტროლი და გრანულის ტრაექტორიის ზუსტი აღდგენა. ამ მიდგომით სამიზნე სისტემას ექნება ყველაზე ნაკლები ურთიერთქმედება ნაწილაკების ნაკადთან. მსგავსი სისტემა საშუალებას მოგვცემს ასევე ვცვალოთ სამიზნის ეფექტური სიმკვრივეც.

გარდა ელექტრონიკისა მსგავსი სისტემის შექმნა საჭიროებს არაერთი რთული საინჟინრო ამოცანის გადაჭრას როგორც ელექტრული ისე მექანიკური მიმართულებით. ნებისმიერი ელექტრული და მაგნიტური ველის გამოყენება თავიდან უნდა იქნას აცილებული, რაც სრულიად ახალი გამსროლ-დამჭერი მექანიზმის შექმნას საჭიროებს. სამიზნის სიჩქარის ზუსტად დასადგენად საჭიროა შეიქმნას სპეციალური ტრიგერის და ფრენის დროის (TOF) საზომი ხელსაწყო, რომელიც შედგება ორი სწრაფი ფოტოდiodისა და ლაზერისგან. ლაზერის გადაკვეთისას დაგენერირდება ტრიგერის სიგნალები და გადაეცემა მონაცემთა დამუშავების სისტემას დროის ინტერვალის დასათვლელად. მოძრაობის ტრაექტორიის დასადგენად გამოიყენება სწრაფი CMOS კამერა და FPGA სისტემა გამოსახულების დამუშავებისთვის და შესაბამისი ტრეკირების მონაცემების გამოსაანგარიშებლად. გამოყენებულ FPGA სისტემაში ჩაშენებული ARM პროცესორი საშუალებას გვაძლევს მარტივად გავცვალოთ ინფორმაცია დეტექტორის სხვა ნაწილებთან და მოვახდინოთ ინფორმაციის სინქრონიზაცია.



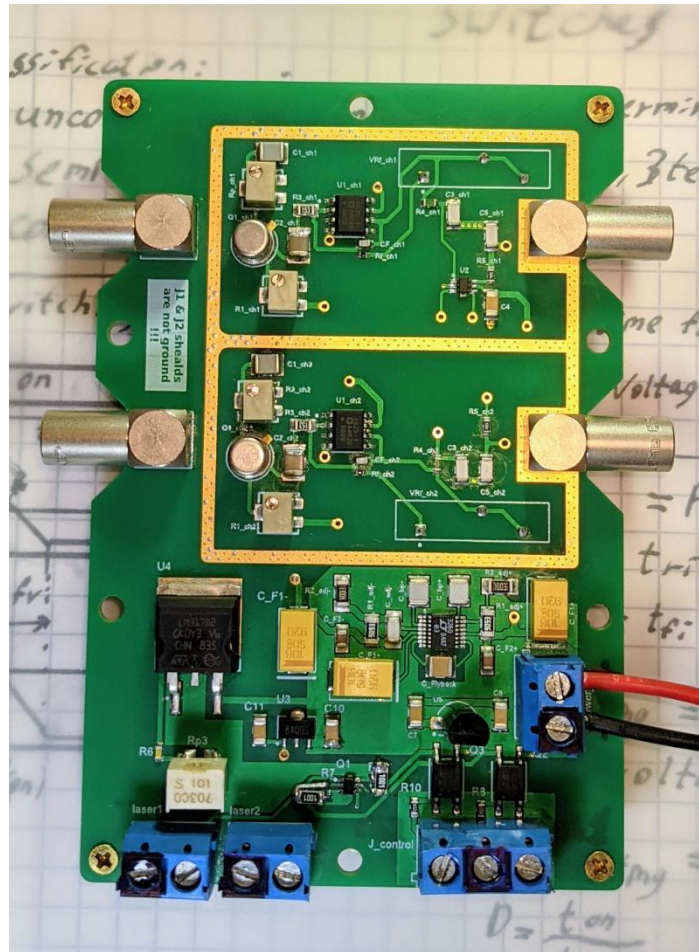
სურათი 1 სამიზნე სისტემის მუშაობის ბლოკ სქემა



სურათი 2 სამიზნის სისტემის ტექნიკური დიაგრამა

TOF და ტრიგერის სისტემა

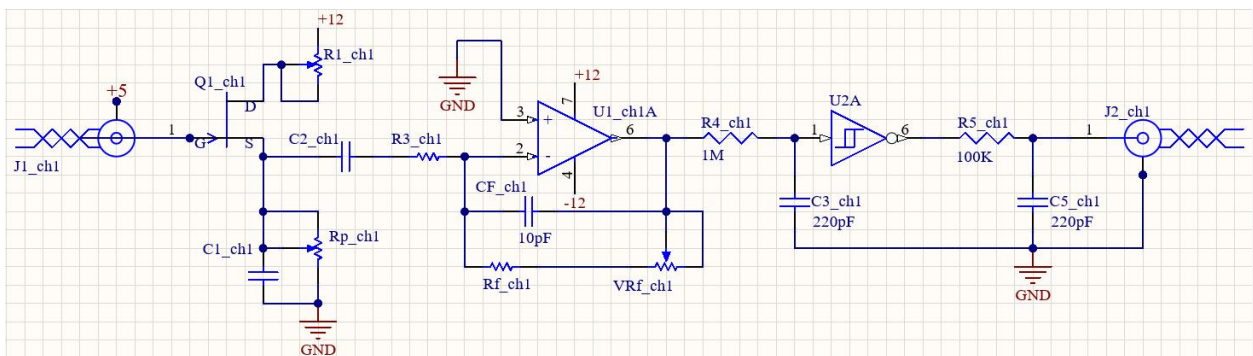
TOF სისტემა წარმოადგენს დამოუკიდებელ ელექტრონულ ბეჭდურ დაფას PCB რომელზეც დაპროექტებულია ორ არხიანი, დაბალი ხმაურის დონის, მაღალი სტაბილურობის და გამლიერების მქონდე გამამლიერებლები, ორ პოლარული კვების ბლოკი, სიგნალის ფილტრები, ფორმირების სქემები და ლაზერების მართვის სისტემა. ამ სისტემის დანიშნულებაა მცირე, რამდენიმე მილივოლტის დონის, სიგნალის გამლიერება შესაბამის ციფრულ დონეზე, ამ შემთხვევაში 3.3 ვ. გამლიერებისა და გაფილტვრის შემდეგ სიგნალი გადადის FPGA დაფაზე, რომელიც ზომავს დროს დაწყებისა და გაჩერების სიგნალს შორის 450 Mhz პერიოდით და ზომავს სამიზნის ფრენის დროს და სიჩქარეს. სისტემა უნდა აკმაყოფილებდეს შემდეგ კრიტერიუმებს: მაღალი გამლიერების კოეფიციენტი, არხებს შორის სიგნალის მცირე დაყოვნება, მაღალი სტაბილურობა და ელექტრომაგნიტური ხმაურის მიმართ მდგრადობა.



სურათი 3 TOF სისტემის დაფა

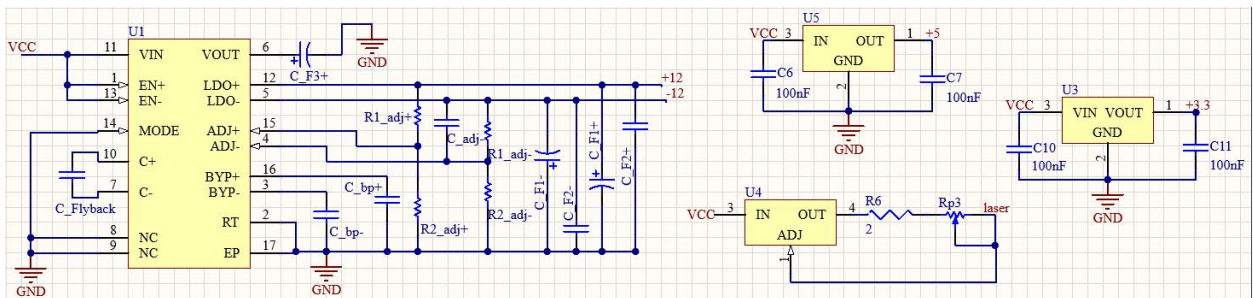
სურათი 3-ზე მარცხენა ზედა მხარეს 2 შესაერთებელი არის ფოტო სენსორებისთვის. სხვა და სხვა ფოტოდოდებზე ჩატარებული ექსპერიმენტებიდან გამომდინარე აირჩა "HAMAMATSU" S1227-16 [8]. კონექტორები მარჯვენა ზედა მხარეს არის გამომავალი სიგნალისთვის, რომელიც მიდის FPGA-ზე, 2 კონტაქტიანი ლურჯი ხრახნიანი შესაერთებელი ქვედა მარჯვენა მხარეს არის მთავარი კვების შესასვლელი რომელიც შეიძლება იყოს 13 ვოლტიდან 32 ვოლტამდე. 3 კონტაქტიანი ლურჯი შესაერთებელი ქვედა მარჯვენა მხარეს არის ლაზერული დოდების მართვისათვის, რომელიც იმართება FPGA დაფიდან, 2 ცალი 2 კონტაქტიანი შესაერთებელი ქვედა მარცხენა მხარეს არის ლაზერების კვებისთვის. დაფაზე არის მულტივი დენის რეგულატორი, რომელიც უზრუნველყოფს ლაზერების სწორ კვებას. დენი შეიძლება დაყენებული იქნას დაფაზე არსებული პოტენციომეტრით, რაც საშუალებას გვაძლევს მივაერთოთ სხვადასხვა

ტიპის ლაზერები. ექსპერიმენტებისთვის გამოყენებული იქნა წითელი ლაზერი ცვლადი ფოკუსით. "HAMAMATSU" S1227-16, არის 1.1 მმ x 5.9 მმ მაღალი მგრძობელობის PIN ფოტო დიოდი. სისტემაში მისი ფოტო მგრძობიარე ფართობი შემცირებულია მექანიკურად მართვადი დიაფრაგმით დაახლოებით 0.1 მმ-მდე, რამაც ეფექტური ფართობი შეამცირა 0.1 მმ X. 5.9 მმ მდე. ფართობის შემცირების საჭიროება გამომდინარეობს იქიდან, რომ გამოსავალი სიგნალის ამპლიტუდა დამოკიდებულია სენსორის აქტიური ფართობისა და სამიზნის ნაწილაკის ჩრდილით გადაფარული ფართობის თანაფარდობაზე. ძალიან ზუსტი მექანიკური სისტემის შემთხვევაში სენსორის აქტიური ფართობი შეიძლება დაყვანილი იქნას სამიზნის გრანულის ზომაზე, რაც მოქცევს მაქსიმალურ გადაფარვას და შესაბამისად მაქსიმალურ სიგნალს. რაც შეეხება სინათლის წყაროს, შესაძლებელია გამოყენებული იქნას ინფრაწითელი ლაზერები რადგან სენსორი ყველაზე მგრძობიარეა სპექტრის ამ რეგიონში, მაგრამ ინფრაწითელი ლაზერები უფრო რთული გამოსაყენებელია ხილულ სპექტრის ლაზერებთან შედარებით და რადგან მგრძობელობა მკვეთრად არ მცირდება, წითელი ლაზერის გამოყენებაც დიდად არ მოქმედებს სიგნალის ამპლიტუდაზე. ექსპერიმენტებში გამოყენებულია წითელ ლაზერები, როგორც სინათლის წყაროს, სხივის სიგანე დაყენებულია დაახლოებით 3.3 მმ-ზე, რაც რეგულირდება ლაზერის ფოკუსირების წერტილის ხელით დაყენებით, ლაბორატორიული ტესტებისთვის ეს ზომა საკმარისია. მექანიკური სისტემის შემუშავების შემდეგ, ლაზერის სხივის სიგანე შეიძლება შემცირდეს, რაც კიდევ უფრო გაზრდის სიგნალის ამპლიტუდას.



სურათი 4 TOF სისტემის გამაძლიერებლის ერთი არხი

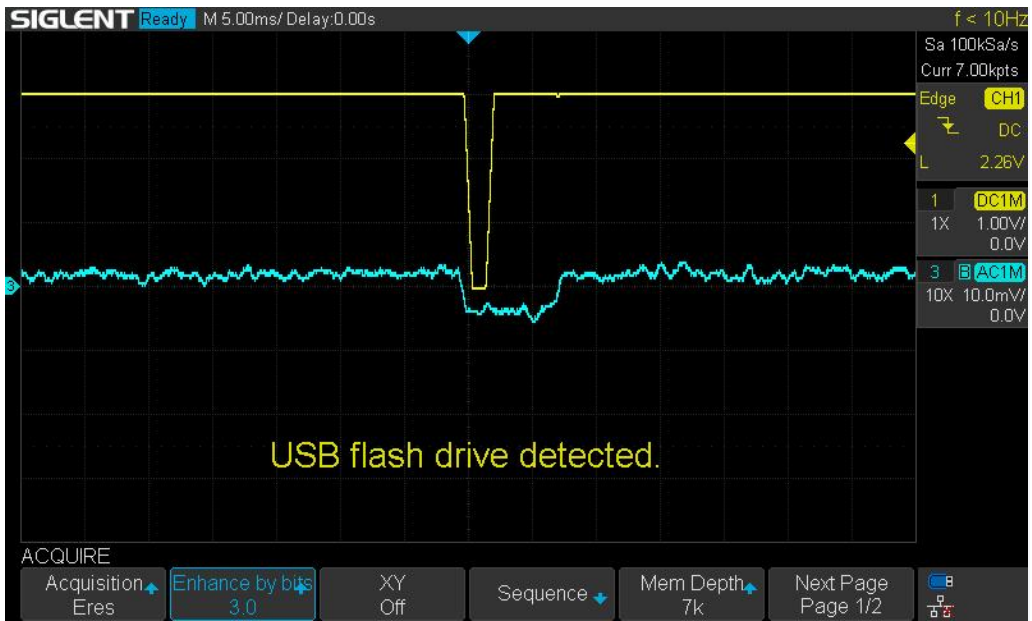
სურათი 4-ზე ნაჩვენებია გამაძლიერებლის ერთი არხის სქემა. კონექტორი J1 არის ფოტოსენსორისთვის. სენსორი სქემაში ჩართულია უკუპოლარობით და მოდებული ძაბვა არის 5 ვოლტი. იქიდან გამომდინარე, რომ სენსორი ძალიან მგრძნობიარეა მოდებულ ძაბვაზე, ხმაურის და უზუსტობების თავიდან ასაცილებლად მათთვის შეიქმნა წრფივ რეგულატორზე დაფუძნებული დამოუკიდებელი კვების წყარო. სიგნალი სენსორიდან დაფას უერთდება კოაქსიალური კაბელის საშუალებით, შემდგომ შედის წინასწარგამაძლიერებელ და ბუფერის სქემაში, რომელიც არის მაღალი შესასვლელი წინაღობის მქონე JFET ტიპის ტრანზისტორზე დაფუძნებული. სიგნალი მთავარ გამაძლიერებელში შედის AC Coupling -ით რომელიც უზრუნველყოფს სიგნალის მუდმივი მდგენელისგან გამოცალკევებას. მთავარი გამაძლიერებელი ADA4625 [9] არის დაბალი ხმაურის მქონე ზუსტი, სწრაფი, rail-to-rail ოპერაციული გამაძლიერებელი, რომელიც სპეციალურად არის შექმნილი ფოტოდოდური სენსორების ინტერფეისებისთვის. გაძლიერების კოეფიციენტი შეიძლება დაყენდეს პოტენციომეტრის საშუალებით 500-650-ის შუალედში. გაძლიერების შემდეგ, სიგნალი გადის რამდენიმე ფილტრში რომელიც ფილტრავს მას მაღალ სიხშირული ხმაურისგან, რომელიც გამოწვეულია სენსორის გაჭონვის დენით და გარე ფაქტორებით. ამის შემდეგ სიგნალი გარდაიქმნება ლოგიკურ 3.3 ვოლტის დონის სიგნალში და ეგზავნება FPGA სისტემას დროის გასაზომად. EMI ხმაურის შემდგომ შესამცირებლად დაფაზე მგრძნობიარე ნაწილებზე გათვალისწინებულია ეკრანირება.



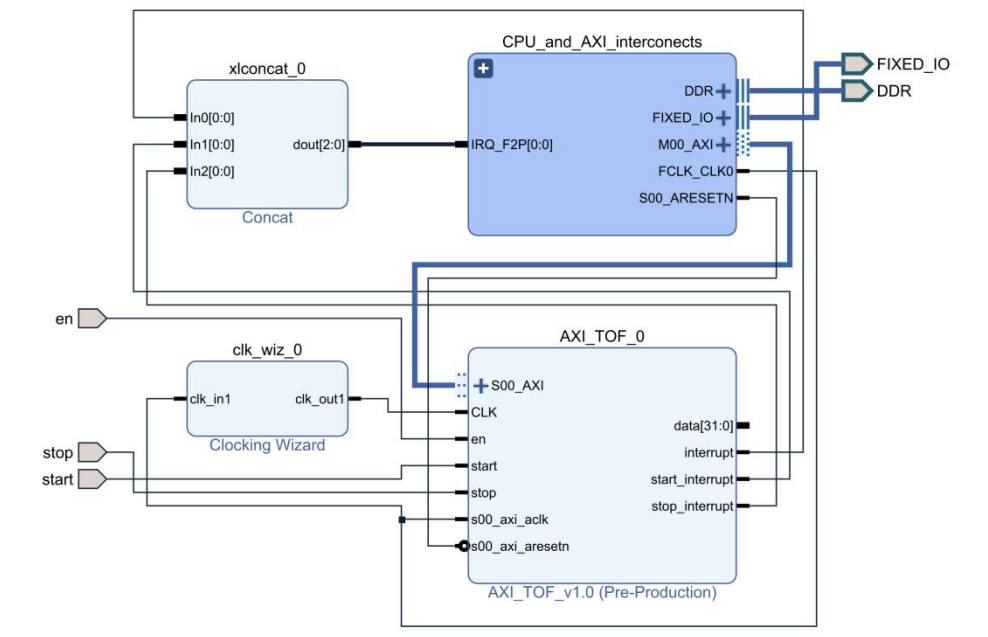
სურათი 5 TOF სისტემის კვების წყარო

სურათი 5-ზე ნაჩვენებია TOF სისტემის კვების წყარო. სქემაზე არის 4 დამოუკიდებელი კვების წყარო, U1 - LTC3260EMSE [10] არის დაბალი ხმაურის დონის, დაბალი დიფერენციალური ძაბვის, ორმაგი პოლარობის კვების წყარო, რომლის მუშა სიხშირე 450-550 კჰც-ია, გამოსასვლელზე კი აქვს დაბალი დიფერენციალური ძაბვის მქონე წრფივი რეგულატორები, რომლებიც ამცირებენ ხმაურს სისტემაში. RMS ხმაური (დოკუმენტაციის მიხედვით) არის 0.1 მვ. ეს რეგულატორი გამოიყენება ოპერაციული გამაძლიერებლის ორპოლარული კვებისთვის. სენსორების კვებისათვის გამოყენებულია ცალკე, დამოუკიდებელი რეგულატორი U5, რადგან სენსორის კვებაში ნებისმიერი ხმაური და უზუსტობა სისტემის სხვა ნაწილებიდან გამოიწვევს ამ ხმაურის სიგნალთან ერთად გაძლიერებას. U3 არის ლოგიკური დონის კონვერტერის კვება რომელიც განსაზღვრავს ციფრული სიგნალის დონეს, U4 კი დაპროექტებულია როგორც მუდმივი დენის წყარო და უზრუნველყოფს ლაზერების კვებას . სურათი 6-ზე ნაჩვენებია სისტემის ერთ ერთი ტესტი, სადაც ერთი არხის სიგნალი არის გაძლიერებული და ცუფრული სიგნალი დაგენერირებული ფილტრაციის შემდეგ. ტესტი ჩატარებულია 400 ნმ ბურთულით, რომელიც თავისუფალი ვარდნით კვეთდა ლაზერის სხივს.

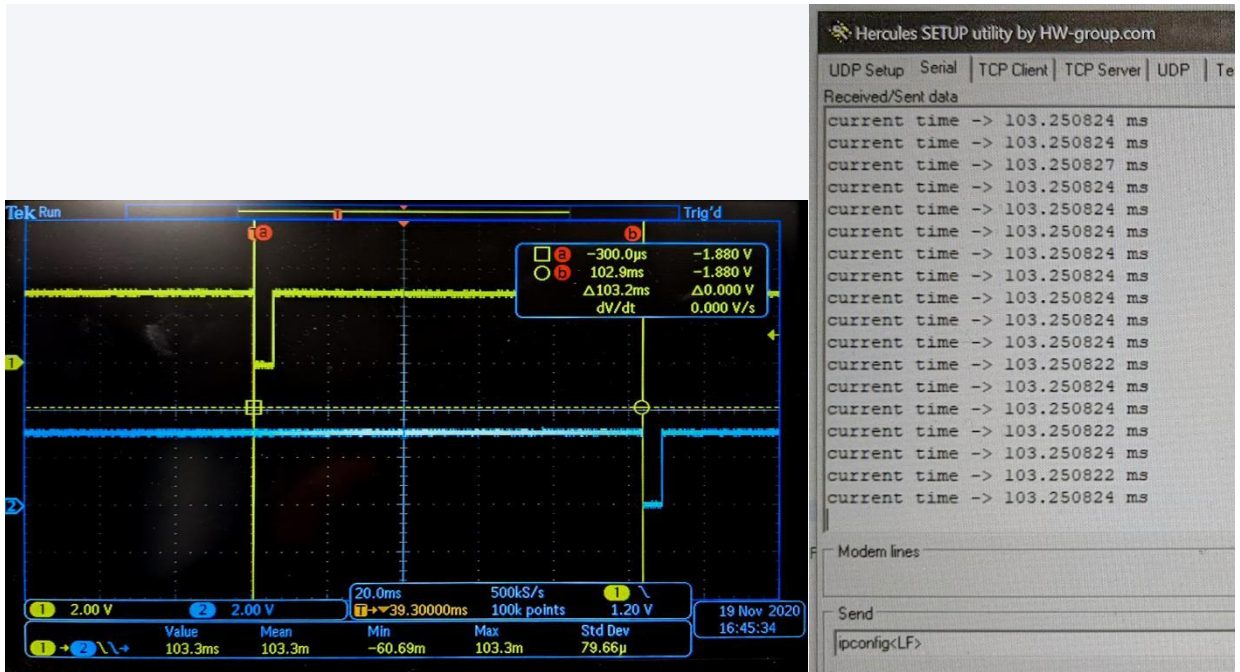
სამიზნის აღმოჩენის შემდეგ, ორი - დაწყების და გაჩერების სიგნალი, იგზავნება FPGA-FPGA-ს ამოცანაა ფრენის დროის გამოთვლა. ეს კეთდება ამ ორ სიგნალს შორის ინტერვალის დათვლით 400 Mhz სიხშირით ექვივალენტური პერიოდის 2,5 ნწ მეშვეობით. FPGA სისტემისთვის დაპროექტდა სპეციალური ბლოკი (IP) რომელსაც აქვს 3 შესასვლელი, ორი START/STOP სიგნალი და ერთი ჩართვა-გამორთვის. ინფორმაციის FPGA-ს სხვა სისტემებთან მიმოცვლისთვის გამოიყენება AXI ინტერფეისი. TOF IP ბლოკი ტრიგერის და დროის ინფორმაციას წერს შესაბამის AXI რეგისტრებში. დაწყება გაჩერების სიგნალები პროცესორს ასევე მიეწოდება წყვეტის სახითაც. სურათი 7-8-ზე წარმოდგენილია FPGA დიზაინი TOF სისტემისთვის და შესაბამისი ტერტირება.



სურათი 6 TOF სისტემის ტესტი, ცისფერი ხაზი - შესასვლელი სიგნალი, ყვითელი - გამოსასვლელი, ტესტი ჩატარებულია 400 ნმ მეტალის გრანულით



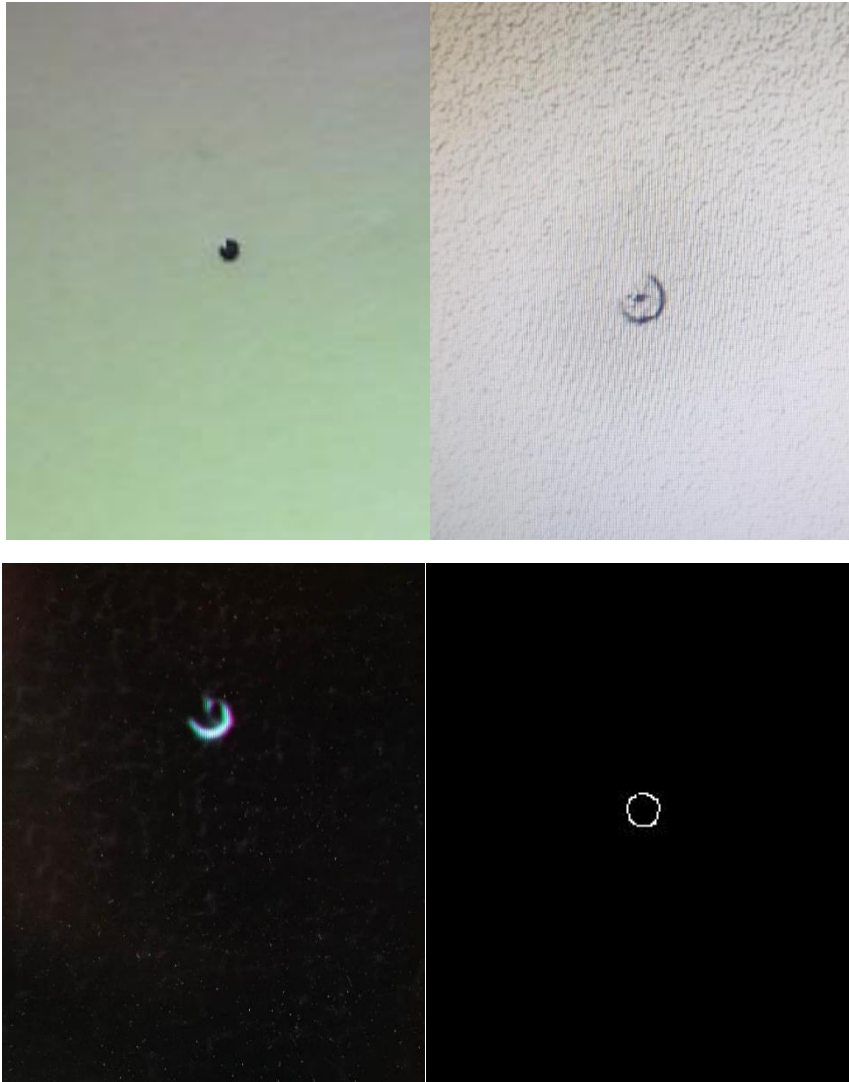
სურათი 7 TOF სისტემის ბლოკ სქემა FPGA-ში



სურათი 8 TOF სისტემის ტესტი, ორ შესასვლელ სიგნალს შორის დაყოვნების დათვლა, ყვითელი ხაზი - სტარტ ტრიგერი, ლურჯი - სტოპ ტრიგერი. მარჯვენა ფოტოზე სისტემის მიერ დათვლილი დრო რომელიც გამოგზავნილია კომპიუტერზე UART ინტერფეისით

გამოსახულების დამუშავება

სამიზნის გრანულის ტრეკირების ინფორმაციის მისაღებად საჭიროა სწორი გამოსახულების დამუშავების სისტემის შერჩევა. დღესდღეობით ბევრი ალგორითმია შემუშავებული სხვა და სხვა ტიპის ობიექტების გადაადგილების დასადგენად. ამ პროექტში საჭიროა გამოსახულების დამუშავების სისტემას შეეძლოს გამოსახულების სწრაფი დამუშავება, რადგან საჭიროა სწრაფი კამერის გამოყენება. ასევე, საჭიროა ადგილმდებარეობის და გადაადგილების დადგენის მაღალი სიზუსტე. ალგორითმი უნდა იყოს მარტივი ჩასაშენებელი FPGA სისტემაში. მარტივი ალგორითმების უმეტესობა ვერ აკმაყოფილებს ზემოთ ჩამოთვლილ მოთხოვნებს. პროექტის განმავლობაში დაიტესტა რამდენიმე 2D ფილტრი, მაგრამ კიდეების ამოცნობა არ იყო საკმარისად ზუსტი. საბოლოოდ, ტესტებზე დაყრდნობით გადაწყდა გამოგვეყენებინა Canny Edge Detection (CED) [11] ალგორითმი, რომელიც უზრუნველყოფს კიდეების კარგ ამოცნობას და არც ისე რთული დასანერგია FPGA სისტემაში HLS ტექნიკის გამოყენებით (სურათი 9).



სურათი 9 ზედა მარცხენა ფოტოზე არის სატესტო გამოსახულება, ზედა მარჯვენა ფოტოზე გამოყენებულია სობელის ფილტრი და ფერების ნივერსია, ქვედა მარცხენა ფოტოზე გამოყენებულია პევიტის ფილტრი, ქვედა მარჯვენა ფოტოზე კი CED - Canny Edge Detect

ვიდეო გამოსახულება მიეწოდება CED ალგორითმის, რომლის მუშაობის პრინციპი შეიძლება დაიყოს 5 ძირითად ნაწილად:

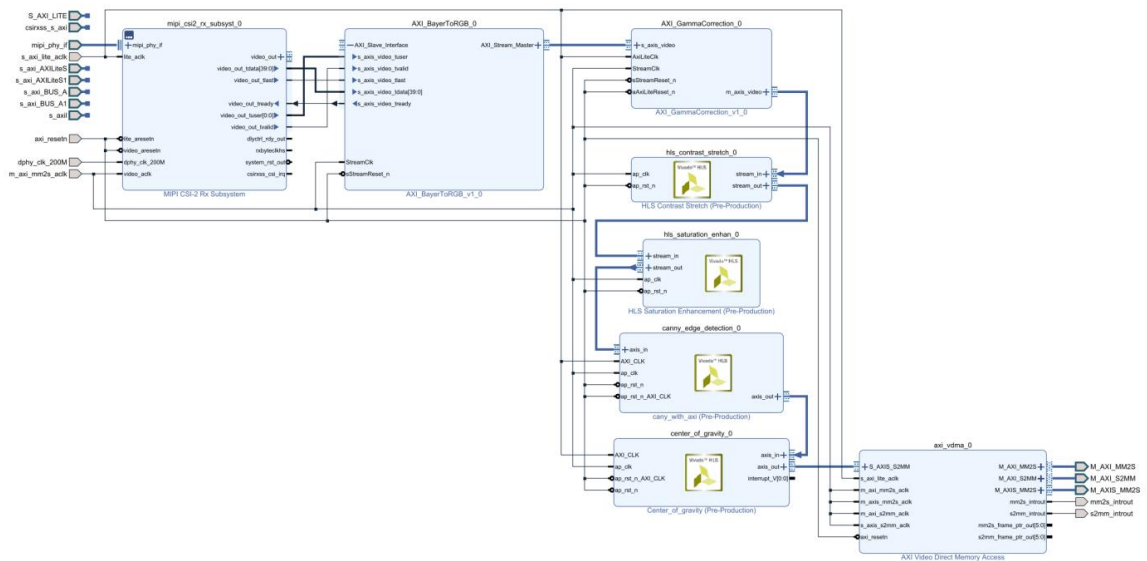
1. თითოეული კადრი უნდა დამუშავდეს გაუსის ფილტრით ხმაურის შესამცირებლად;
2. გამოვითვალოთ ინტენსივობის გრადიენტები;
3. გრადიენტების მნიშვნელობის ზღვრების მიხედვით შერჩევა, არაზუსტი ინფორმაციის გასაფილტრად;
4. ორმაგი ზღვრების მიხედვით პოტენციური კიდეების დადგენა;

5. კიდეების მიკვლევა ჰისტერეზით: კიდეების აღმოჩენა ყველა სხვა კიდეების ჩახშობით, რომლებიც სუსტია და არ არის დაკავშირებული ძლიერ კიდეებთან.

გამოსახულების დამუშავების შემდეგი ნაბიჯი არის სამიზნის კოორდინატების დადგენა და მისი გადაადგილების გამოთვლა. ამ პროექტში გამოიყენება ეგრეთ წოდებული სიმძიმის ცენტრი Center of Gravity (COG) [12] მეთოდი სამიზნის კოორდინატების დასადგენად. იმის გამო, რომ კიდეების აღმოჩენის შემდეგ გამოსახულება ორობითია (კიდეები თეთრია, სხვა ნაწილები შავი), და ჩვენ გვაქვს მხოლოდ ერთი ობიექტი ინტერესის რეგიონში, შეგვიძლია დავითვალოთ საშუალო არითმეტიკული მნიშვნელობა თითოეული პიქსელის კოორდინატების, რაც მოგვცემს ობიექტის ცენტრალური პიქსელის კოორდინატს. ეს გაანგარიშება კეთდება ყოველი კადრისთვის და ინფორმაცია იწერება სპეციალურ რეგისტრში და გენერირდება წყვეტა პროცესორისთვის რომელიც შემდგომ კითხულობს რეგისტრის ინფორმაციას.

FPGA სისტემა

FPGA დიზაინი დაფუძნებულია Digilent Pcam-5C [13] მაგალითზე. კამერის ნაკადი მიეწოდება Digilents MIPI CSI-2 და D-PHY Vivado IP[14] ბირთვებს, შემდეგ გადადის რამდენიმე გამოსახულების დამუშავების ბლოკში და გამომავალი გადაიცემა HDMI ინტერფეისით. Pcam 5C[15] იყენებს OV5640 5MP ფერადი გამოსახულების სენსორს. მონაცემების მიღება ხდება MIPI CSI-2 ინტერფეისით. FFC კონექტორი თავსებადია Raspberry Pi-სთან[16], რაც თეორიულად გვაძლევს შესაძლებლობას გამოვიყენოთ Raspberry Pi-თან თავსებადი კამერებიც. Digilent-ის MIPI IP შემუშავებულია და დატესტილია Pcam 5C-სთვის და არ არსებობს ინფორმაცია ამ IP-ით სხვადასხვა კამერის გამოყენების შესახებ, მცდელობის მიუხედავად, ვერ შევძელით სხვა კამერიდან სწორი გამოსახულების მიღება. სურათი 10-ზე ნაჩვენებია სატესტო სისტემის გამარტივებული ბლოკ სქემა.



სურათი 10 FPGA დიზაინი

MIPI CSI-2 Receiver IP-ის გამოსავალი სიგნალი არის AXI სტანდარტის შესაბამისი ვიდეო ნაკადი, რომელიც შეიცავს ინფორმაციას დაუმუშავებელი პიქსელების შესახებ,

ეს მონაცემები გადაეცემა AXI_BayerToRGB IP-ს რომელიც ბაიერ ტიპის დაუმუშავებელ ინფორმაციას გარდაქმნის RGB პიქსელებად, ამის შემდეგ კეთდება გამა კორექცია და გამოსახულება AXI-VDMA IP-ს საშუალებით იწერება ოპერატიულ მეხსიერებაში. ყველა მოცემული IP კონფიგურირდება პროცესორიდან და მათი პარამეტრების შეცვლა შესაძლებელია მუშაობის დროს. საბოლოოდ გადავწყვიტეთ Xilinx-ის მიერ დაპროექტებული Xilinx MIPI CSI-2 RX ქვესისტემის [17] გამოყენება. მისი გამოყენება გვაძლევს მეტ მოქნილობას და კონტროლს კამერების ფართო სპექტრზე, ის ასევე შეიცავს Linux-ის დრაივერებს, რომლებიც შეიძლება ძალიან სასარგებლო იყოს სისტემის განახლებისთვის დამოუკიდებელი firmware-დან ჩაშენებულ Linux-მდე. ქვესისტემა იღებს სურათებს MIPI CSI-2 კამერის სენსორებიდან და გადმოსცემს AXI4-Stream ვიდეო მონაცემებს, რომლებიც მზად არის გამოსახულების დამუშავებისთვის. სისტემის გამართულად მუშაობისთვის საჭიროა დაკონფიგურირდეს რამდენიმე სიხშირის წყარო, 400 - 450 მჰც TOF სისტემისთვის, 200 მჰც MIPI ინტერფეისის ეტალონური სიხშირისთვის, 100 მჰც AXI ინტერფეისისთვის, ხოლო ვიდეო გამოსახულების პიქსელების სიხშირე დამოკიდებულია რამდენიმე ცვლადზე და საჭიროა მისი გამომანგარიშება სისტემის პარამეტრებიდან გამომდინარე.

$$Pclk = Total\ Horizontal\ Samples * Total\ Vertical\ Lines * FPS$$

$$Total\ Data\ Rate\ (Bandwidth) = Pclk * Pixel\ Size\ (bits)$$

$$Data\ Rate\ per\ Line = Total\ data\ Rate / Number\ of\ Data\ Lines$$

ამ ფორმულებზე დაყრდნობით, შეგვიძლია დავითვალოთ მინიმალური სიხშირე, რაც დაჭირდება გამოსახულების დამუშავების სისტემას ინფორმაციის დასამუშავებლად. მაღალი სისწრაფის კამერის შემთხვევაში (IMX219 [18]), გვაქვს 640x128 გარჩევადობა, ამ გარჩევადობით FPGA-სთვის თეორიული მაქსიმალური კადრების სიხშირე (Zynq 7000 მოწყობილობების მაქსიმალური სიჩქარე არის 1200 Mbps) იქნება დაახლოებით 2900 FPS, მაგრამ კამერა ამ სიჩქარეს ვერ აღწევს. არაოფიციალური წყაროებით [19] კამერას შეუძლია მიაღწიოს 640x128 მაქსიმუმ 682 FPS 4 ხაზოვანი mipi ინტერფეისით, რადგან ჩვენს FPGA დაფაზე მხოლოდ 2 ხაზიანი mipi ინტერფეისია, კადრების სიხშირე იქნება დაახლოებით 341 FPS. ამ პარამეტრებით მინიმალური PCLK უნდა იყოს 28 Mhz ამ შემთხვევაში გამტარუნარიანობა იქნება 280 Mbps. თითოეული ფრეიმი გადადის

გამოსახულების დამუშავების მიმდევრობას (image processing pipeline) და იწერება RAM-ში სადაც გამოყოფილია 32 კადრის ზომის წრიული ბუფერი, რაც ნიშნავს იმას, რომ ყოველ მოცემულ მომენტში შეგვიძლია გვექოდნეს 32 კადრი დასამუშავებლად. ამჟამად სისტემა იყენებს დამოუკიდებელ firmware-ს FPGA-ს ჩატვირთვასა და კონფიგურაციისთვის, ის ასევე აკონტროლებს რამდენიმე IP ბლოკის პარამეტრებს გაშვების დროს და აბრუნებს გამოსახულების დამუშავების ბლოკის მონაცემებს UART ინტერფეისის გამოყენებით. პროგრამული უზრუნველყოფა შედგება რამდენიმე დრაივერისაგან სხვადასხვა ნაწილისთვის, როგორცაა კამერა, I2C ინტერფეისი, VDMI, TOF, წყვეტების კონტროლერი, HDMI ინტერფეისი და მათთან დაკავშირებული ტაიმერები. ამჟამად სისტემას შეუძლია 2 კამერასთან მუშაობა, Pcam 5c OV5640 სენსორით და Raspberry pi კამერა IMX219 სენსორით. ცხრილი 1-ში ნაჩვენებია პარამეტრები რომელთა შეცვლაც მუშაობის პროცესშია შესაძლებელი. მაქსიმალური სიჩქარე OV5640 სენსორისთვის 320X240 გაფართოვებაზე არის 120 FPS, ხოლო IMX219 - ის შემთხვევაში 640X80 გაფართოვებაზე 500 FPS. სისტემის გაშვებისას პროცესორი აკონფიგურირებს FPGA-ს და ტვირთავს შესაბამის დრაივერებს. კამერის პარამეტრებიდან გამომდინარე VDMI სისტემა გამოყოფს 32 ფრეიმის ზომის მეხსიერებას, სადაც კამერის მონაცემები მუდმივად იწერება, ყოველი ჩაწერა წაკითხვისას სისტემა უგზავნის პროცესორს წყვეტის სიგნალს და პროცესორი იმახსოვრებს კადრის მისამართს მეხსიერებაში და კითხულობს გამოსახულების დამუშავების ინფორმაციას სამიზნის ადგილმდებარეობის შესახებ კონკრეტულ კადრში. სამიზნის ადგილმდებარეობა გამუდმებით იწერება მეხსიერებაში ყოველი კადრისთვის, იმისთვის რომ ვიცოდეთ რომელი კადრები უნდა გამოვიყენოთ საბოლოო ანალიზისთვის, TOF სისტემა გვაწვდის, როგორც სამიზნის სიჩქარის ინფორმაციას, ასევე start და stop წყვეტას, ამ მონაცემების სინქრონიზაციით შეგვიძლია მეხსიერებიდან ამოვიღოთ ის ინფორმაცია რომელიც საჭირო იქნება საბოლოო ანალიზისთვის. ამჟამად მოცემული ინფორმაცია იგზავნება კომპიუტერზე UART ინტერფეისის საშუალებით.

Parameter	Value(s)
Resolution	OV5640 (1 = 1280x720, 2 = 640x480, 3 = 320x240), IMX219 (1 = 1280x720, 2 = 640x128, 3 = 640x80)
Write to image sensor register	address and value of sensor register in hex
Read from image sensor	address of image sensor register in hex
Gamma correction values	1, 1/1.2, 1/1.5, 1/1.8, 1/2.2
Saturation	0 = 0, 1 = -0, 2 = 0.2, 3 = 0.4, 4 = 0.6, 5 = 0.8, 6 = 1.0, 7 = 1.2
Contrast	0 - 255 in hex
Operating mode	Bypass or Image processing mode
Canny edge detection thresholds	High, Low thresholds and zero padding in hex
Camera analog gain	Gain of the sensor to compensate low light in high FPS
Camera integration time	Different for every resolution, but can be overridden to change the FPS (not all values will work)

ცხრილი 1 კამერის პარამეტრები

შეჯამება

ბოლოს მინდა შევაჯამო მიღწეული შედეგები:

- პირველი და ყველაზე მნიშვნელოვანი შედეგი არის ბალისტიკური სამიზნის კონცეფციის შემუშავება. ამ ტიპის სამიზნე სრულიად ახალია და საჭიროებს შემდგომ შესწავლას. ეს ძირითადად ეხება მექანიკურ კონსტრუქციას, რომელიც არ იყო ამ სამუშაოს ნაწილი. სამიზნის შემუშავებული აპარატურა და პროგრამული უზრუნველყოფა არის კარგი საწყისი წერტილი სამიზნის შემდგომი განვითარებისთვის. შემუშავებული სისტემები შესაძლებელია გამოყენებული იქნას სხვა ამოცანებისთვის, სადაც საჭიროა გამოსახულების სწრაფი დამუშავება MIPI კამერის ნაკადის ან HDMI გამოყენებით;

დაპროექტებული FPGA-ს დიზაინი საშუალებას გვაძლევს მარტივად შევიმუშაოთ გამოსახულების დამუშავების სხვა და სხვა ალგორითმი და მარტივად ჩავაშენოთ სისტემაში. სპეციალური დრაივერები აკონტროლებენ FPGA სისტემას და უზრუნველყოფენ ინფორმაციის მიმოცვლას;

• შემუშავებული TOF სისტემა, რომელიც შედგება სპეციალური PCB-სა, FPGA IP-სგან და აპარატურის დრაივერისაგან, გვაძლევს ტრიგერის ინფორმაციას და ზომავს მათ შორის დროს 2.5ns-ის სიზუსტით. გამოსახულების დამუშავებისა და TOF სისტემების გაერთიანება შესაძლებელს ხდის სამიზნის გრანულის გადაადგილების ზუსტ რეკონსტრუქციას და დეტექტორის სისტემასთან ერთად შესაძლებელს ხდის განისაზღვროს პოლარიზაციის განაწილება ნაკადის შიგნით.

- შეიქმნა რამდენიმე საინჟინრო გადაწყვეტა, მათ შორის მყარი ბლოკის სამიზნის კონტროლის სისტემა (კონტროლის პროგრამული უზრუნველყოფა და მართვის ელექტრონიკის ნაწილი);

- შემუშავებულია მთელი TOF სისტემა. ჩატარდა რამდენიმე ტესტი შესაბამისი სენსორის, ლაზერის და გამაძლიერებლის ტოპოლოგიის ასარჩევად. შემუშავებულია მაღალი გამძლიერების მქონე, ზუსტი, დაბალი ხმაურის დონის ორ არხიანი გამაძლიერებელი და სიგნალის ფორმირების სქემა და ნაბეჭდი დაფა (PCB). შეიქმნა

სპეციალური IP და აპარატურის დრაივერი TOF მოდულის FPGA სისტემაში ინტეგრაციისთვის. მოცემული სისტემის ტესტები ჩატარდა 3D პრინტერზე დაბეჭდილი მარტივი მექანიკური სისტემის გამოყენებით, რის მიხედვითაც სისტემა ოპტიმიზირდა 400 nm გრანულისთვის;

- შეიქმნა ტესტირების რამდენიმე სისტემა კამერის და HDMI ნაკადების გამართულად მუშაობის შესამოწმებლად. წარმატებული ტესტების შემდეგ, გამოსახულების დამუშავების რამდენიმე მეთოდი იქნა გამოყენებული მონაცემთა ნაკადიდან ობიექტების კონტურების ინფორმაციის მისაღებად. საბოლოოდ, შეირჩა Canny Edge Detection ალგორითმი, მისი სიმარტივისა და კარგი წარმადობის გამო. შეიქმნა სპეციალური IP Vivado HLS-ის გამოყენებით;

- შეიქმნა კიდევ ერთი გამოსახულების დამუშავების ალგორითმი, რომელიც ანგარიშობს გამოსახულების სიმძიმის ცენტრს. მოცემული ალგორითმი საშუალებას გვაძლევს დავადგინოთ სამიზნის გრანულის ცენტრის კოორდინატები. ამ ალგორითმების შესამოწმებლად შეიქმნა სატესტო ვიდეო, რომელიც გენერირებულია 3D პროგრამული უზრუნველყოფის გამოყენებით, სადაც სიმულირებულია სამიზნის გრანულის თავისუფალი ვარდნა სამიზნის კამერაში. ვიდეო სიგნალი გადაეცემა გამოსახულების დამუშავების ალგორითმებს FPGA-ში და ტრეკირების სისტემა მონაცემებს უგზავნის კომპიუტერს UART კომუნიკაციის გამოყენებით. ტესტმა აჩვენა, რომ სისტემას შეუძლია სწორად აღმოაჩინოს სამიზნე და დაადგინოს მის კოორდინატები გადაადგილებისას. ყველა მოდული კონტროლდება Zynq ტიპის SoC-ში ჩაშენებული პროცესორით და შესაფერისი დრაივერების გამოყენებით. გამოსახულების დამუშავების ალგორითმებში შესაძლებელია პარამეტრების რეგულირება მუშაობის დროს.

შესაძლებელია კამერის სიჩქარის და გარჩევადობის შეცვლა მაქსიმალური წარმადობის მისაღებად. სისტემა მუშაობს წრიული ბუფერის რეჟიმში. გვაქვს 32 კადრის ბუფერი. ნებისმიერ მომენტში ხელმისაწვდომია წინა კადრებიც.იმ შემთხვევაში, თუ იქნება გარკვეული დაყოვნება TOF, ტრიგერის და კამერის ნაკადის მონაცემებს შორის, შეგვიძლია ტრეკირების რეკონსტრუქცია დავიწყოთ წინა კადრებიდან.

მიუხედავად ძირითადი სამუშაოებისა, რომლებიც შესრულდა პროექტის ფარგლებში, ჯერ კიდევ არის გარკვეული სამუშაო, რაც უნდა გაკეთდეს იმისათვის, რომ შევძლოთ მოცემული სისტემის გამოყენება რეალურ ცხოვრებაში. უპირველეს ყოვლისა, უნდა შემუშავდეს მექანიკური ტესტის სისტემა, რომელიც მოგვცემს სისტემის კომპლექსური ტესტირების შესაძლებლობას. ჯერჯერობით სისტემას არ გააჩნია დეტექტორის სხვა სისტემებთან ინტეგრაციის მექანიზმი, ის მუშაობს როგორც დამოუკიდებელი მოწყობილობა. მას შემდეგ, რაც სისტემის მექანიკური ნაწილები გაუმჯობესდება, შესაძლებელი იქნება დეტექტორის სხვადასხვა ნაწილთან ინტეგრირება და მონაცემთა მიმოცვლა.

ლიტერატურა:

- [1] A. Sakharov, Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz. 5, 32 (1967).
- [2] A. Dolgov and Y. Zeldovich, Rev. Mod. Phys. 53, 1 (1981).
- [3] Makoto Kobayashi, Toshihide Maskawa, CP-Violation in the Renormalizable Theory of Weak Interaction, Progress of Theoretical Physics, Volume 49, Issue 2, February 1973, Pages 652–657, <https://doi.org/10.1143/PTP.49.652>
- [4] V. Bargmann, Louis Michel, and V. L. Telegdi, Phys. Rev. Lett. 2, 435 (1959).
- [5] F. Müller et al 2020 JINST 15 P12005
- [6] Otari Javakhishvili Power Supply Development for JEDI Polarimetry, Agricultural University of Georgia Tbilisi, Georgia , 2018.
- [7] <https://epics.anl.gov/about.php>
- [8] <https://www.hamamatsu.com/eu/en/product/optical-sensors/photodiodes/si-photodiodes/S1227-16BQ.html>
- [9] <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ada4625-1-4625-2.pdf>
- [10] <https://www.analog.com/en/products/ltc3260.html>
- [11] https://en.wikipedia.org/wiki/Canny_edge_detector
- [12] Malik, Abdul & Thörnberg, Benny & Cheng, Xin & Lawal, Najeem. (2011). Real-time Component Labelling with Centre of Gravity Calculation on FPGA.
- [13] <https://digilent.com/reference/learn/programmable-logic/tutorials/zybo-z7-pcam-5c-demo/start>
- [14] <https://github.com/Digilent/vivado-library/tree/master/ip>
- [15] <https://digilent.com/shop/pcam-5c-5-mp-fixed-focus-color-camera-module/>
- [16] <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-3-model-b/>
- [17] <https://www.xilinx.com/products/intellectual-property/ef-di-mipi-csi-rx.html>
- [18] <https://www.waveshare.com/imx219-d160.htm>
- [19] https://github.com/circuitvalley/mipi_csi_receiver_FPGA

Acknowledgement

First and foremost I am extremely grateful to my supervisors, Prof. Zaza Metreveli and Dr. Irakli Keshelashvili for their invaluable advice, continuous support, and patience during my PhD study. Their immense knowledge and plentiful experience have encouraged me in all the time of my academic research and daily life. I would also like to thank "The Shota Rustaveli National Science Foundation of Georgia (SRNSFG)" for their financial support (grant number JFZ_18_01). Special thanks to the Forschungszentrum Juelich, Institute of Nuclear Physics and its director Prof. Dr. Hans Ströher and Dr. Andro Kacharava for accepting me as a PhD student and giving me the ability to work on this awesome project. Big thanks to David Mchedlishvili, the head of Smart|EDM_Lab Tbilisi, for project support. Also big thanks to students Fabian Müller, Mikael Gagoshidze, Dachi Okropiridze, Irakli Lomidze and others students from Georgia for their kind help and support that have made my study and life in the Germany a wonderful time. Finally, I would like to express my gratitude to my parents and friends. Without their tremendous understanding and encouragement in the past few years, it would be impossible for me to complete my study.

Contents

Recommendation of the commission of scientific direction	iii
Author’s declaration	v
abstract	vii
Georgian annotation of the thesis	xi
Acknowledgement	xlvi
List of Figures	xlix
List of Tables	liii
List of Acronyms	liv
List of Articles	lvii
1 Introduction	1
2 Physics Motivation	5
2.1 Matter-Antimatter Asymmetry	5
2.2 Electric Dipole Moment	6
2.3 EDM searches in Storage Rings	7
3 JEDI Polarimeter (JePo)	9
3.1 General Considerations	9
3.2 Detector Concept	12
3.3 Calorimeter Modules	13
3.4 Current target	17
3.5 Dedicated Multi-channel Power Supply	20
3.5.1 Power supply upgrade and improvement	22
3.6 Data Acquisition and Readout	28
3.7 JePo Installation at COSY and Spin Response	30

4	Ballistic Pellet Target	35
4.1	New concept development	35
4.2	TOF and Trigger System	40
4.3	Camera overview	43
4.4	FPGA system development	45
4.5	TOF in FPGA	46
4.6	Image Processing	48
	4.6.1 Canny Edge Detect	49
	4.6.2 Center of Gravity	51
4.7	FPGA design	52
5	Conclusions	59
	Bibliography	61

List of Figures

1	a) (left panel) Principle of EDM measurement: radial E-field - torque on spin-rotation out of ring plane; b) (right panel) Frozen spin method: The spin (red arrow) and momentum (blue arrow) vectors are kept aligned during the storage time.	7
2	Measurements of the laboratory frame differential cross section, analyzing power, and modified figure of merit $[\sigma A_y^2 \sin\theta]$ for proton scattering from carbon at $T_p = 250$ MeV [11] (left) and deuteron scattering from carbon at $T_d = 270$ MeV [13] (right).	10
3	Variation by color of the figure of merit across the polarimeter based on $d+C$ elastic scattering [13]. The black lines show the locations of the 52 LYSO crystals used in the current version of the EDM polarimeter.	10
4	Artistic sketch of the polarimeter concept. The essential parts of the system are the target section, vacuum flight chamber (an energy degrader may be incorporated), and the detector itself. For the best particle identification, a thin plastic scintillator layer will be installed in front of dense inorganic scintillators where the scattered particles will be stopped.	12
5	Schematic setup for the measurement of the Bragg-peak determination. By rotating the modules, a different path length is selected.	14
6	Reconstruction of the Bragg-peak in LYSO for 270 MeV deuterons and its comparison to results of Geant4 simulations.	14
7	Left: the first version of SiPM readout with SensL C-series 35 μm pixel size sensors. Right: a new generation SensL J-series sensor with 20 μm pixels size, having no dead edges on individual SiPM's and reduced gaps between the pixels. Resulting in substantially higher pixel density and in a better dynamic range.	15
8	Module design for the LYSO coupled to the SiPM array.	16
9	LYSO-SiPM module before and after assembly. Module ingredients are also shown. With the red square, the silicon interface is exposed.	16
10	Current carbon block target used in detector, sizes are 2x2x3 cm.	17
11	Block target control diagram	17

12	Block target mounting. The stepper motor moves outer magnet (black part on the rod) which is coupled with inner magnet and target	19
13	Block target hardware interlock system	19
14	Block target control software.	20
15	Test setup for SiPMs (a) and obtained result (b).	21
	(a) Schematic drawing of SiPM test setup	21
	(b) Collected mean charge from the SiPM as a function of applied voltage	21
16	power supply pre regulator	23
17	noise level of the pre regulator output.	24
18	Temperature dependency of the power supply module after the upgrade.	25
19	Voltage stability as function of time. The output voltage of one of the power supply modules is shown (middle) together with the reference voltage (bottom) in parallel with the ambient temperature recording (top). Note that the drops in the output voltage are caused by turning the power supply modules off. The reference voltage source remains turned on all the time.	26
20	Voltage stability of the upgraded power supply. The output voltages of four typical power supply modules are shown (middle) together with the reference voltage (bottom) and the ambient temperature recording (top). Note that the whole power supply was off during some period of time. This is indicated by a drop in the output voltages at around 190 hours.e	27
21	Data acquisition system for the dedicated polarimeter. The connection between the experimental area and the detector is with a 10 Gbit/s optical link.	28
22	Pulse height spectra for one row of LYSO crystals shown in order of increasing scattering angle. The filled area indicates the fixed hardware threshold used during the event trigger. The cross section weighted scattering angle is also given for each spectrum.	29
23	(left panel) 2-D histogram of events as a function of LYSO pulse height on the X-axis and energy-loss (ΔE) on the Y-axis. The vertical limits marked in dashed red determine which range ($\pm 3\sigma$) is used for the elastic projection. The horizontal limits marked in red determine which events are recorded for further analysis. (middle panel) Projection of the ΔE scintillator in the region of the elastic peak. (right panel) Projection of the selected events on the LYSO crystal energy axis. A Gaussian shape with a linear background is used to illustrate the deuteron elastic peak. The sum for this feature without background subtraction is used as the primary data stream for determining polarization, as illustrated in Fig. 22.	29

24	Left: The COSY storage ring (circumference 184 m) The beam enters from left bottom part of the diagram and circulates in a clockwise direction. The additional beam pipe is for an extracted beam. Right: drawing of the polarimeter. The beam, indicated by the red arrow, enters from bottom right side. The orange adapter flanges at the front and rear are planned to contain Rogowski coils to provide the X and Y beam position. The 6-way cross contains two flanges that hold movable targets. This is followed by an expansion chamber that ends with an 800 μm stainless steel exit window. Thus the detectors are in air. The LYSO (blue) crystals are mounted on two movable tables. The energy loss (ΔE) detectors are not included in this drawing, but would appear in front of the LYSO calorimeter.	30
25	Left: The assembled polarimeter in its place in the COSY storage ring. The beam goes from left to right. Right: A graphite block target (2x3x3 cm^3) mounted on a movable rod. The beam would go about 3 mm above the top face of the carbon block.	31
26	(Top) Raw asymmetries from a series of beam stores, in which the polarization cycle changes from negative (state 1) to positive (state 2) and then finally unpolarized (state 0). Only the data taking portion is retained. (Bottom) Asymmetries calculated for each column of three LYSO crystals in order from those closest to the beam to those farthest away. The asymmetry values depicted in blue were calculated using a cross-ratio method applied to the two polarized beam states. The red and magenta values represent half-cross-ratio calculations based on the negative and positive polarization states, respectively, compared to the unpolarized state. Only the magnitudes are shown.	32
27	Part of the online logging system output for polarimeter runs. The counting rates for the four quadrants of the polarimeter appear on upper panel that are nearly flat for the data acquisition period. The green trace shows the summed count rate. The start of beam extraction onto the target generates a spike in rate. The blue trace in the lower panel shows the declining stored beam intensity. Times are shown along the horizontal axis in seconds.	33
28	Results of a comparison between a single wire and a single pellet moving across a circulating beam. The three curves correspond to 100%, 10% and 1% interaction probability (from left to right) for each of the two cases. Due to the much larger beam-target overlap, the beam intensity is reduced much faster for the wire than for the pellet	38

29	Results of an experimental investigation of the interaction of a wire with the COSY beam for two consecutive cycles: the top graph shows the rate in a detector, the bottom part the stepwise reduction of beam intensity for each beam crossing of the wire.	38
30	ballistic pellet target system diagram: 1 - throw-catcher mechanism, 2 - lasers, 3 - PIN photo diodes, 4 - camera, 5 - light source	39
31	ballistic pellet target system diagram 2	40
33	one channel of the amplifier	42
34	Power supply for TOF system	42
35	The first test of TOF board, blue is the input signal, which is 100 μm thick wire dropping in the laser beam and detected with photosensor. Yellow is the output signal	43
32	TOF and Triggering PCB	43
36	The difference between CCD and CMOS camera readout	44
37	The Different Parts of an FPGA	46
38	Simplified TOF design	47
39	The results of the delayed signal test, data is sent to the laptop using UART interface (Left) generated delayed signals using signal generator(Right) . . .	48
40	1.Image captured from FPGA board (no image processing); 2. same image processed using color invert and Sobel filter; 3. Test using Pewitt filter; 4. Test using canny edge detect.	48
41	5×5 kernel for Gaussian blur	49
42	3×3 kernel for Sobel filter	50
43	Canny edge detection steps	51
44	Simplified overall system design	54
45	Video processing pipeline	56
46	small video demonstration of image processing and object tracking with simulated pellet dropping in target chamber	58

List of Tables

3.1	Table lists the main characteristics of the calorimeter modules.	22
4.1	Table lists the parameters which can be changed from UART terminal and will be applied on run-time	57

List of Acronyms

EDM Electric Dipole Moment	ix
srEDM Storage Ring Electric Dipole Moment	ix
COSY Cooler Synchrotron	ix
LYSO Lutetium–yttrium oxyorthosilicate	ix
SiPM silicon photo multiplier	ix
ADC Analog to Digital Converter	ix
SoC System on Chip	ix
FPGA Field Programmable Gait Array	ix
TOF Time of Flight	ix
JEDI Juelich Electric Dipole Moment Investigation	liv
JePo Juelich Electric Dipole Moment Investigation (JEDI) Polarimeter	1
PCB Printed Circuit Board	2
HDMI High Definition Multimedia Interface	3
IP Intellectual Property	2
CPV CP-violation	5
BAU baryon asymmetric universe	5
nEDM neutron EDM	6
sr storage ring “sr”	7
GUI Graphical User Interface	4
WASA Wide Angle Shower Apparatus	4
CPT Charge, Parity, Time reversal	5
FOM Figure of Merit	9
PMT Photo Multiplier Tube	15

APD Avalanche Photo Diode	13
CAD Computer-Aided Design	16
EPICS Experimental Physics and Industrial Control System	18
UART Universal Asynchronous Receiver-Transmitter	47
CCD Charge-Coupled Device	43
CMOS Complementary Metal Oxide Semiconductor	43
DAC Digital to Analog Converter	44
LUT Look Up Table	45
BRAM Block RAM	45
SOC System On Chip	45
IDE Integrated Development Environment	45
TCP Transmission Control Protocol	45
CPU Central Processing Unit	ix
MCU Microcontroller Unit	18
PV Process Variable	18
FADC Flash ADC	28
HLS High level synthesis	46
AXI Advanced eXtensible Interface	46
ROG Region of Interest	51
COG Center of Gravity	52
MIPI Mobile Industry Processor Interface	46
CSI Camera Serial Interface	46
FFC Flat Flexible Cable	53
PPI PHY-Protocol Interface	53
RAM Random-access memory	53
DDR3L Double Data Rate three Low voltage	46
DMA Direct Memory access	46
VDMA Video Direct Memory Access	53

FPS Frames per Second	55
I2C Inter-Integrated Circuit	55
GPU Graphical Processing Unit	45
HDL Hardware Description Language	46
LDO Low-dropout regulator	41
EMI Electromagnetic interference	41
EDDA Excitation function Data acquisition Designed for the Analysis of phase shifts	35
JFET junction-gate field-effect transistor	41
JuDiT Jülich Ballistic Diamond Pellet Target for Storage Ring EDM Measurements	36
VHSIC Very High Speed Integrated Circuit	liv
VHDL Very High Speed Integrated Circuit (VHSIC) Hardware Description Language	46

List of Articles and Conferences

Content of the thesis is based on the publications by author:

1. O. Javakhishvili et al. - "Development of a multi-channel power supply for silicon photomultipliers reading out inorganic scintillators" - NIMA 977, 164337 (2020)
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900220307348>
2. O. Javakhishvili et al. - "A storage ring EDM polarimeter" - J. Phys.: Conf. Ser. 1561 012011 (2020)
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1561/1/012011>
3. F. Müller, O. Javakhishvili, D. Shergelashvili, I. Keshelashvili, D. Mchedlishvili et al., – "A new beam polarimeter at COSY to search for electric dipole moments of charged particles", JINST 15, P12005 (2020)
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/15/12/P12005/pdf>
4. I.Keshelashvili, O.Javakhishvili, D.Mchedlishvili, D.Shergelashvili - "Development of a Dedicated Precision Polarimeter for Charged Particle EDM searches at COSY",
<https://pos.sissa.it/379/006>
5. I.Keshelashvili, F. Müller, O. Javakhishvili et al. – "A modular calorimeter based on LYSO scintillator crystals with SiPM readout" (in preparation for resubmission)

List of conferences

1. 2022 Talk - "Pellet target development for an EDM measurements at COSY" Mainz, Germany DPG Spring Meeting
2. 2021 Talk - "Pellet target development for storage ring EDM polarimetry" Matsue, Japan Spin 2021
3. 2019 Talk - "A storage ring EDM polarimeter" Messina, Italy DESYT 2019 - Detection Systems and Techniques in Nuclear and Particle Physics.

Chapter 1

Introduction

Among the most fascinating miracles of Nature stands the puzzle of our existence. In the Big Bang, matter and antimatter should have been produced equally [1]. When matter and antimatter meet, they annihilate into photons. The question of why there is only matter and almost no antimatter found in our universe remains unanswered. During the evolution of the very early universe, a tiny asymmetry – approximately 1 part in a billion, (i.e., 1,000,000,001 particles and 1,000,000,000 antiparticles) – appeared at some point, and after the annihilation process, the totality of the one left-over particle constitutes the matter of our world (notwithstanding dark matter, one of the other modern cosmological puzzles).

The search for the reason of such asymmetry, so called search beyond the standard model, consists of two main directions: research at high energy, for example experiments on the Large Hadron Collider and its alternatives, and precise measurements - the use of advanced technologies and methods in relatively low energy environments that enable to increase the accuracy of experiments. Such a direction is the search of electric dipole moments of charged particles ([EDM](#)) at storage rings, which requires specialised equipment and its main part - calorimeter. The experiment which my PhD project is part of, is called [JEDI](#), its storage ring accelerator [COSY](#) and newly developed detector [JEDI](#) Polarimeter ([JePo](#)) gives us the ability to further investigate asymmetries and polarisation of elementary particles. The detector will be described later in details, but in general it is a new type of detector, using inorganic scintillators, modular design and high efficient [SiPM](#) modules. It can measure energies of particles produced by the interaction of the beam particles (deuteron, proton) with target (carbon) interaction. The advantages of this type of detector is that it can work in high magnetic and electric fields, it has very high detection and data taking efficiency as well as short and long term stability.

Beside of detection part of the polarimeter, one of the most crucial parts of it is the target system, as it has big influence on the data as well as the beam itself. Considering the complexity of the experiment and EDM measurement, development of the target system leads to the state of the art approaches in all direction (hardware, software and mechanical). In this work most concentration will be on hardware and software parts of the project as the mechanical part is still in phase of concept development and out of scope of this project. The new target type which was developed is the ballistic carbon pellet target. The requirements for the target were defined by the requirements from the experiment as well as drawbacks from other targets (see chapter 4.1). During the project implementation the concept for the target system has been developed (see chapter 4). As an engineering task, the project has been divided into several key objectives to be fulfilled:

1. Proper hardware platform, with sufficient operational power is needed for system to work. Since high speed camera, fast trigger and time measurement systems are needed, the best approach would be mix of FPGA and CPU.
2. TOF and triggering system hardware, which consists of dedicated Printed Circuit Board (PCB) with high stability, high gain amplifiers and signal shaping circuit, which are needed for precise triggering and TOF measurements:
 - Sensor selection and laser tests. As there are lots of different sensors with different characteristics, tests should be done to find out appropriate sensor and its companion laser;
 - PCB development for TOF is somewhat challenging task, as it needs techniques such as low noise PCB development, low amplitude signal handling and high stability, high gain amplification and filtering.
3. Simple mechanics to test TOF system after PCB development to ensure that everything works fine. The amplifier can handle the low signal and there is no noise at the output.
4. FPGA system development
 - Custom Intellectual Property (IP) development for object detection, proper algorithms for object detection, which will be able to subtract pellet target from background, definition of edges for further processing;
 - Custom IP development for object tracking. After edge detection, the system should be capable of tracking the target and provide its coordinates.

- **TOF FPGA IP** development. As the signals are detected, amplified and shaped with the **PCB**, the rest is to measure the time between start and stop triggers, transfer this information to **FPGA** and then to do the signal sampling and time calculation with dedicated **IP**;
 - Develop **FPGA** block design for tests (stream camera signals to the processing system and then stream processed information to the High Definition Multimedia Interface (**HDMI**) display or stream simulated signals from computer through **HDMI**, process it and stream processed data to **HDMI** display) . Develop proper video pipeline in **FPGA** in order to get the camera stream from the camera sensor and further process it in **FPGA**. Beside camera stream, for better tests of the image processing, better to have **HDMI** input and to feed predefined, simulated video signals to the system in order to check the performance of image processing.
5. **CPU** firmware development so as to be able to communicate, control and get information from the pellet system. Develop proper drivers for different parts such as:
- Custom standalone driver for object detection;
 - Custom standalone driver for object tracking;
 - Custom standalone driver for **TOF** and triggering system;
 - CPU firmware for communication with this system and data exchange.
6. System integration with whole detector

The author was involved in **JePo** development nearly from the beginning. has taken part in assembling of detector modules and some other mechanical parts, has developed multi-channel power supply with monitoring system [82]. During detector development external experimental hall was used, where the beam was routed. Different types of targets were tested and the carbon target was chosen. In these experiments the beam was shoot directly through the target. Later the detector was installed in the accelerator ring. In this case the target can't stay constantly in the way of the beam and needs to be moved in and out. Otherwise the accelerator will not be able to accelerate the beam as it will hit the target. The first task was to develop the block target control system (see chapter 3.4), which is used in experiments now. In parallel of that author started development of the pellet target system parts such as **TOF** module, with its **PCB** and its associated **IP**. After **TOF** is finished the work was concentrated on camera implementation into **FPGA**, image processing and object

tracking. The author also worked on several side projects including improvements for power supply system, target control software Graphical User Interface ([GUI](#)) for Wide Angle Shower Apparatus ([WASA](#)) detector and [FPGA](#) gate driver for RF-WIEN filter with its control [GUI](#)

Chapter 2

Physics Motivation

2.1 Matter-Antimatter Asymmetry

There must be a difference between matter and antimatter (particles and antiparticles), which has actually been observed in elementary particle decays: $\eta = \frac{N_B - N_{\bar{B}}}{N_\gamma}$, where η is a baryon asymmetry parameter, N_B is the number of baryons, $N_{\bar{B}}$ is the number of anti-baryons and N_γ is the number of photons. This difference is due to a symmetry breaking and is referred to as CP-violation (**CPV**) [2]: C stands for charge symmetry (the change from positive to negative electric charge of a particle, and vice versa) and P for parity symmetry (mirror symmetry, more precisely the inversion of all spatial coordinates). The combined CP-symmetry changes a particle into an antiparticle; its nonconservation, e.g., in neutral-kaon (K^0) decays, constitutes the proof that particles and antiparticles are not identical. The **CPV**, which has been found in these decays and which has been included into the Standard Model (SM) of elementary particle physics, is, however, too small by many orders of magnitude to explain the baryon asymmetric universe (**BAU**). A violation of time reversal invariance (T-symmetry, T being the change of the direction of time) is equivalent to **CPV** by means of the so-called Charge, Parity, Time reversal (**CPT**) theorem, which states that the combined symmetry of C, P, and T correlates two allowed states or physical processes: in order for CPT to be conserved, both T- and CP symmetry must be violated. By contrast, a (C-, P-, T- or CP-)-symmetry violation implies that after the application of the corresponding transformation, a different state or process results that is not (or differently) observed in nature. Note that T-violation has not yet been directly observed, but only is inferred from **CPV**.

To explain the asymmetry between matter and anti-matter, in 1967 by Andrei Sakharov

defined three conditions that have to be fulfilled [3]:

- Baryon number violation. Without this violation, it would not be possible for a system to evolve from a state with no baryons into a state with baryons, as the system initially was in a state with a baryon number $B = 0$.
- C and CP violation. If C and CP invariance were fully conserved, for each process that created a particle, another process that created an antiparticle with the exact same probability would exist, and therefore also no baryon asymmetry could have developed.
- Deviation from thermal equilibrium. In thermal equilibrium, the expected value of all physical quantities are stable and it would be impossible for the system to transit from a $B = 0$ into a $B \neq 0$ state.

The SM does fulfill these requirements up to a certain extent, but the amount of CP violation is too small to account for the observed baryon asymmetry. This means that other sources of CP invariance have to be found. This is where the **EDM** of particles such as neutrons and protons enter the stage.

2.2 Electric Dipole Moment

Permanent **EDM** of elementary particles (the spatial separation of the center-of-gravity of the positive and negative charge distributions) is defined as $\vec{d} = \eta \frac{q\hbar}{2mc} \vec{S}$, where \vec{S} is the spin, q is the charge, m is the mass of the particle and η is a dimensionless quantity giving the magnitude of the EDM [4]. It violates parity (P) and time reversal (T) symmetry, and thus – via CPT – also CP. If an **EDM** were to be found, it would indicate a new and additional **CPV** source, which might be responsible for the **BAU**. It would also imply the necessity for an extension of the well-established Standard Model towards so-called New Physics. This is why **EDMs** are sought for in many different particles, without success up to now: only impressive upper **EDM**-limits have been obtained. For the neutron **EDM** (**nEDM**), it is around $10^{-26} e \cdot cm$ – which, if the neutron would be the size of the earth, would approximately correspond to a charge separation of less than 10 μm . The smallness of an **EDM**, and thus of any minuscule observable effect, make **EDM** searches a very challenging project.

2.3 EDM searches in Storage Rings

For the neutron [EDM](#), the improvement of sensitivity by 6 orders of magnitude has been achieved over a period of about 50 years. Expectations are that further sensitivity improvements by one order of magnitude can be achieved within the next decade or so. [EDMs](#) of charged particles (proton, deuteron) appear to offer the potential to increase the sensitivity limit towards $10^{-29} e \cdot cm$, a significant improvement with respect to [nEDM](#) discovery potential. Since an [EDM](#) is detected by its interaction with an electric field, and charged particles will be accelerated in such fields, the basic idea of a charged particle [EDM](#) search is as follows: (i) inject a beam of polarized particles into a storage ring “sr” ([sr](#)), apply a radial electric field E to the stored particles, and observe the time development of the polarization vector of the particles. In a particle like the proton, the polarization vector (“spin”) provides the only orientation direction; the [EDM](#) (vector) must be parallel to the spin. The interaction with a radial E -field will cause a torque on the [EDM](#) and thus the particles spin – originally aligned in the storage-ring plane (“longitudinally”) – of the coasting beam in the ring with no longitudinal component. As a result, it will very slowly rotate the so-called longitudinal polarization into the vertical direction: this will be the experimental observable for the existence of an [EDM](#), the principle of the [EDM](#) measurement can be seen on figure 1. The requirements of experiments using a storage ring beam to search for an [EDM](#) on the nuclei of the beam circulating in ring, have been reviewed here [[5](#), [6](#), [7](#)].

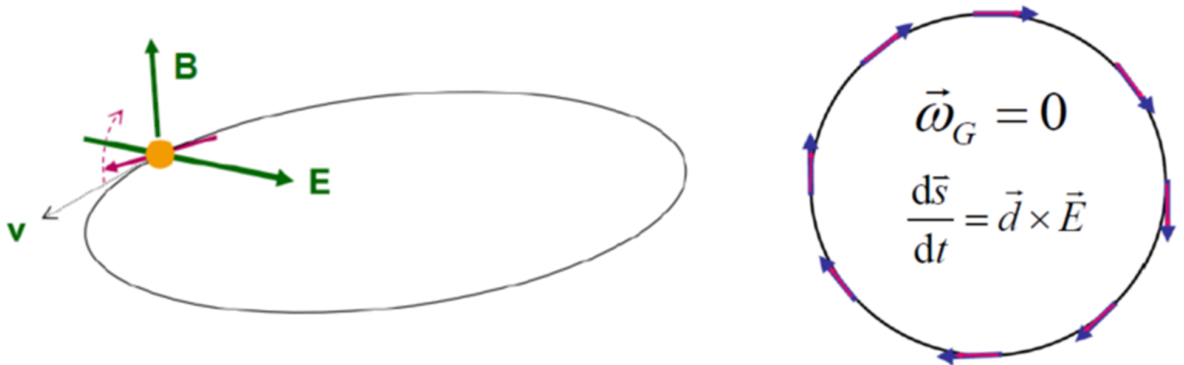


Figure 1: a) (left panel) Principle of EDM measurement: radial E -field - torque on spin-rotation out of ring plane; b) (right panel) Frozen spin method: The spin (red arrow) and momentum (blue arrow) vectors are kept aligned during the storage time.

Experimental [EDM](#) searches are conducted for leptons (electrons, muons) and for neutrons, in atoms, molecules and bulk matter, but up to now, in spite of pushing the sensitivity limits further and further, no finite [EDMs](#) have been observed. Recently, a new idea has been put forward to directly search for [EDMs](#) of non-leptonic charged particles, in particular

protons and deuterons, in dedicated high-precision storage rings [srEDM](#). This method may offer the highest sensitivity – up to $10^{-29} e \cdot cm$, i.e., 3 orders of magnitude better than the current neutron limit. Such measurements are also required to unfold the underlying source(s) of [EDMs](#). At the same time, it involves many technological challenges connected with the new kind of storage ring with two counter-rotating polarized beams, whose changes of polarization as a function of time have to be monitored with ultimate precision. Up to now, the polarization measurement of a beam of stored particles is provided by directing it onto a bulk carbon block by means of steerer magnets or by imposing a white-noise signal on the beam, and then detecting the azimuthal asymmetry of the scattered particles in a suitable detector. This method is well established in hadron physics experiments, but it implies a number of draw-backs (which will be discussed later) which make it inapplicable for the purpose of storage ring [EDM](#)-searches: a new approach is required.

Chapter 3

JEDI Polarimeter (JePo)

3.1 General Considerations

A high-sensitivity polarimeter, requires small statistical errors from within a reasonable running time. In addition, the analyzing power, which sets the scale of the sensitivity of the scattering to beam polarization, should be as large as possible. Robust targets, carbon or somewhat with higher mass must be used. Usable scattering angles may range from the outer edge of the Coulomb-nuclear interference at a few degrees to roughly $\theta_{lab} = 15^\circ$. These features are almost independent of nuclear structure, arising mainly from the central and spin-orbit interactions between the projectile and the nucleus that are well described by the optical model [8, 9, 10, 11, 12, 13].

To illustrate the selection of appropriate operating angles for the polarimeter detectors, consider the laboratory frame cross sections and analyzing powers for the scattering reactions $p + C$ and $d + C$ in Fig. 2. The figure also shows a modified figure of merit. The usual definition, Figure of Merit (FOM) = σA_y^2 , has been augmented with $\sin(\theta_{lab})$ to recognize the increase in the available solid angle for all azimuthal angles as the polar scattering angle increases. This figure of merit varies as the inverse square of the statistical error in a polarization measurement, hence it is important to maximize the integral of this quantity in the choice of polarimeter angle coverage. At the same time, areas of low analyzing power should be avoided, since a large analyzing power provides more leverage against systematic errors. Red lines (4° to 15° in Fig. 2) mark a range that would be desirable to exploit in a polarimeter detector scheme.

Figure 3 shows a 2-D map of the figure of merit across the polarimeter front face for a vertically polarized beam. The best areas (yellow) are to the left and right of the beam

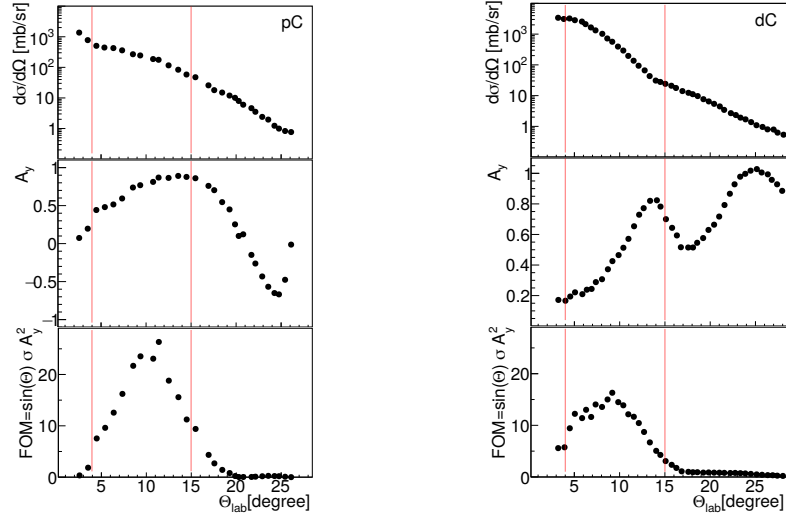


Figure 2: Measurements of the laboratory frame differential cross section, analyzing power, and modified figure of merit $[\sigma A_y^2 \sin\theta]$ for proton scattering from carbon at $T_p = 250$ MeV [11] (left) and deuteron scattering from carbon at $T_d = 270$ MeV [13] (right).

center. The figure also includes the dependence on the cosine of the azimuthal angle (ϕ), which appears in the formula for the cross section dependence on spin [15] for protons:

$$\sigma_{pol}(\theta, \phi) = \sigma_{unpol}(\theta)[1 + p_y A_y(\theta) \cos\phi] \quad (3.1)$$

where σ is the differential cross section, p_y is the vertical component of the polarization, and A_y is the corresponding analyzing power. For deuterons with spin-1, an additional factor of 1.5 appears ahead of the pA term. The rectangular grid superimposed on Fig. 3

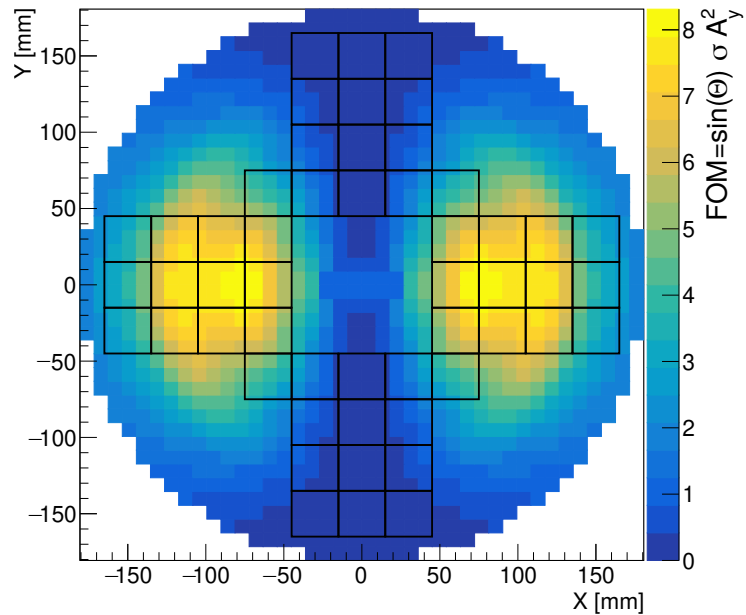


Figure 3: Variation by color of the figure of merit across the polarimeter based on $d + C$ elastic scattering [13]. The black lines show the locations of the 52 LYSO crystals used in the current version of the EDM polarimeter.

illustrates the front-face locations of the presently installed (52) LYSO calorimeter modules.

This grid overlaps strongly the most useful region in terms of polarimeter statistics. This 2-D pattern applies to the asymmetry generated by Eq. 3.1, which, for example, produces a left-right (L/R) difference in the scattering rates for an upwardly polarized projectile. This pattern may be rotated by 90° to correspond to an up-down (U/D) asymmetry associated with the measurement of a sideways polarization. Both pieces of information are important. In the EDM search, the EDM signal appears as a slowly increasing vertical component (L/R asymmetry). The in-plane polarization will be controlled using real-time feedback to the storage ring RF cavity so that the polarization is always parallel to the particle velocity. This condition will be checked, and corrected, based on the deviations of the U/D asymmetry from zero. The axion experiment [16, 17], which searches for an oscillating EDM, will look for a jump in the L/R asymmetry as the storage ring revolution frequency is scanned. The U/D signal will be monitored after unfolding the in-plane rotation [18, 19] to verify that polarization is not lost due to decoherence of the particle spin tunes.

In order to reach the sensitivity goals of the EDM search of 10^{-29} e-cm on the proton, the polarimeter must be able to detect rotations into the vertical plane at the level of μrad using beam storage times of at least 1000 s [20] accumulated during a total operating time of about one year. This requires more than 10^{12} good polarimeter events. The beams will consist of 10^{10} particles per fill, split between counter-rotating beams. This implies trigger rates before event selection in the range of 10^6 /s, which must be recorded with minimal rate-dependent distortions. This suggests that the polarimeter would work best in trigger mode, responding to information above some threshold rather than processing pulse height or timing information in order to make a more intricate cut. Stability will be important so as not to distort any changes in the vertical polarization between the beginning and the end of a beam store. Thus, any cuts that define events should be insensitive to changes in rates or the machine environment. Final analysis of such data will likely involve corrections for systematic rate and geometry errors [21].

The carbon block target used during the commissioning tests was 20 mm thick. The deuterons used for the commissioning run had $p = 970$ MeV/c ($T_d = 238$ MeV). Given the angle coverage shown in Fig. 3, the efficiency of detector arrays should be about 1 %. This efficiency is defined as the ratio of the detected events used for a polarization measurement to the number of stored beam particles lost in the process. This is close to the limit for any polarimeter configuration [23, 24, 25].

The carbon block has demonstrated that such a target may be operated near a stored beam and that results in a very efficient use of the beam particles in polarization measure-

ments [21]. However, it has the disadvantage that sampling of the beam is not uniform. Electron cooling, which is usually done for typical times of 75 s prior to any use of the beam, has the potential to homogenize the beam, thus reducing the chance of a significant polarization variation over the beam cross section. However, earlier tests at higher intensities have shown that the beam exhibits features that are consistent with there being some segregation between outer halo parts, where the polarization lifetime is smaller and a core, where it is larger. At present, work has started on a pellet system that sends small targets (e.g. diamond pellets) through the beam, with a tracking system [26].

3.2 Detector Concept

A polarimeter capable of satisfying the requirements of the storage ring EDM experiment needs to be compact, perhaps fitting into an insertion length in the storage ring that is no longer than a meter. The modular assembly will be a favored approach due to its easy maintenance. Also, this will give us the possibility to reconfigure the polarimeter depending on the physics goal. Modularity will also fit in the future plan if the storage ring EDM measurement employs counter-rotating bunches in a dedicated electrostatic accelerator. In this case, oppositely directed detector assemblies at either end of the block target can be rearranged to meet this requirement and measure polarization for CW and CCW bunches.

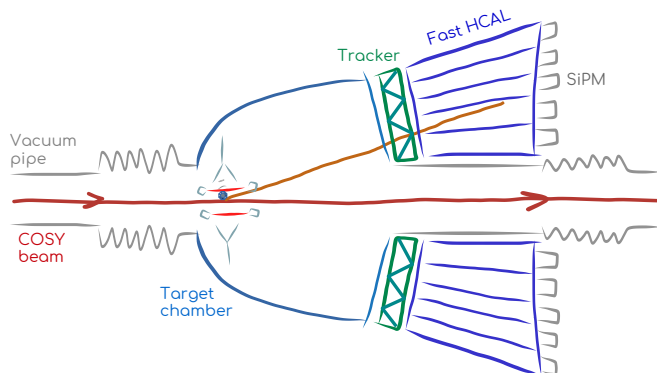


Figure 4: Artistic sketch of the polarimeter concept. The essential parts of the system are the target section, vacuum flight chamber (an energy degrader may be incorporated), and the detector itself. For the best particle identification, a thin plastic scintillator layer will be installed in front of dense inorganic scintillators where the scattered particles will be stopped.

The best-known way to monitor the polarization of a proton or deuteron beam is by using elastic scattering from a target with a large analyzing power. The standard target material for a scattering experiment at these energies is carbon. The best ways to identify the elastic scattering is through a precise measurement of the ejectile kinetic energy. It would

also be beneficial to know the scattering angle and to have a ΔE layer in front for particle identification. In our concept, a two-centimeter thick plastic scintillator layer is expected to be installed before the calorimeter. The ΔE counter will consist of two layers of overlapping triangular blocks (see Fig. 4). The position will be determined from the energy sharing ratio between overlapping pieces.

For the full track reconstruction, we are trying to implement a new method. In most of the cases, the tracks are reconstructed using two-dimensional tracking detectors and then extrapolated to the beam-target interaction point. In contrast to this, we are developing a pellet target with a precise pellet tracking system. By synchronizing the pellet trajectory with detector timing, the precise interaction point will be determined.

Finally, the calorimeter part must have excellent energy resolution with long and short term energy calibration stability. The time dependence of the light output of the scintillating material will be important. Nanosecond time resolution is necessary to be immune to pile-up peak shape distortion. Because the storage ring EDM search requires a long experimental time, a radiation-hard material would be favored. The high material density will substantially shorten the module length. And the detector must not produce strong magnetic and electric fields that would disturb the minuscule EDM effects. For this reason, we avoided the use of a magnetic spectrometer and favored our polarimeter design using inorganic scintillating material.

3.3 Calorimeter Modules

During the whole development period, we have iterated through several ideas. Finally, the SiPM array based module has been chosen for its compatibility with storage ring EDM experiments.

Cerium-doped LYSO crystals has been identified to have nearly optimal properties from which to construct a calorimeter. LYSO is known to have very high light output, roughly 32 photons per keV. It is also known to be a very fast scintillator with a decay time of roughly 41 ns. The emitted light, which peaks at 420 nm, perfectly matches most light sensors, photomultiplier tubes, as well as all semiconductor sensors such as PIN, Avalanche Photo Diode (APD) and SiPM. LYSO is not hygroscopic, is dense (7.1 g/cm^3), and is radiation hard.

To determine the minimum length of the LYSO crystal for use in an EDM polarimeter, the measurement of the Bragg-peak was one of the primary goals of the first deuteron beam

time. Previously, there was no experimental evidence for the LYSO crystal response to a deuteron beam of 270 MeV.

In the first test setup, two different configuration/sizes of LYSO crystal were used, In one

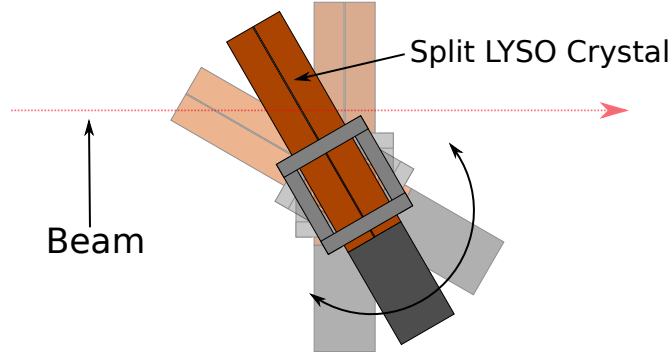


Figure 5: Schematic setup for the measurement of the Bragg-peak determination. By rotating the modules, a different path length is selected.

module, there was two LYSO crystals with dimensions of $15\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ mounted side by side and coupled through separate light guides to a dual channel PMT [94]. With light shielding in between, it was possible to obtain the deposited energy in each individual crystal in this module. A second module was equipped with a single LYSO crystal with dimensions of $30\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 100\text{ mm}$. These two modules were mounted on a mechanical structure that allowed us to move them along the horizontal and the vertical axis relative to the beam as well as rotate the modules, such that the length of the particle penetration path inside the crystal could be calculated as a function of the rotation angle, as shown in Fig. (5).

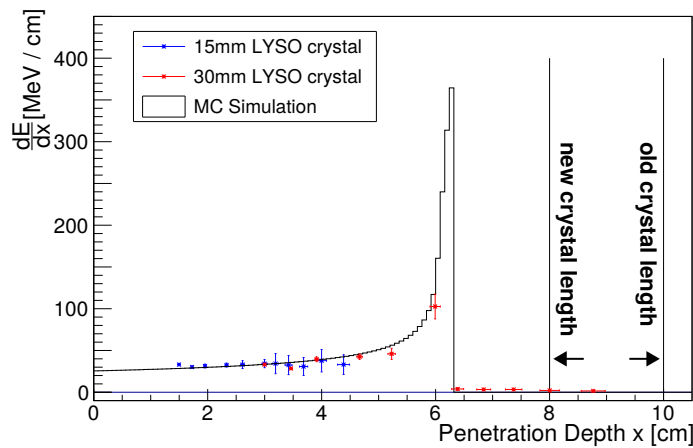


Figure 6: Reconstruction of the Bragg-peak in LYSO for 270 MeV deuterons and its comparison to results of Geant4 simulations.

This measurement lead to the conclusion, that a 8 cm long LYSO crystal is sufficient for the purpose of the final polarimeter at 270 MeV. The fact that majority of the energy is deposited in a dept around the Bragg-peak of roughly 6 cm has another advantage Figure 6.

In full configuration of the detector we require 120 units of crystals, whose size is $3 \times 3 \times 8 \text{ cm}^3$. Finally, the polarimeter detectors will cover a full solid angle from 4° to 15° . For the moment we have 52 fully operational modules already tested during five different beam times. But, in case of a long accumulation of the radiation damage (especially in the vicinity of Bragg peak), the crystals may be flipped along the beam axis to double their lifetime.

All detectors dedicated to measure electromagnetic showers usually use crystals longer than 10 cm. The EDM experiment case is entirely different. We are expecting to measure scattered deuterons and protons below 300 MeV kinetic energy. This energy range allows the LYSO crystal length to be below 8 cm. The front face of the LYSO crystals was fixed to be $30 \times 30 \text{ mm}^2$. The crystals are pulled against the sensor with two very thin ($25 \mu\text{m}$) Kapton strips using the force of a wave spring incorporated into the module construction. All modules are wrapped with a thin, $50 \mu\text{m}$ reflective layer and finally by light tight Tedlar wrapping of $50 \mu\text{m}$ thickness. For the final configuration, we decided to use $50 \mu\text{m}$ Teflon wrapping for the crystals. The air coupling between the photosensors and LYSO crystals are 1-mm thick silicon interface [30].

Based on the information acquired with tests on Photo Multiplier Tube (PMT) modules, we designed and tested the silicon photomultiplier (SiPM) readout. In the first test, we used a 4×4 matrix of $6 \times 6 \text{ mm}$ SensL SiPM's with total area $24 \times 24 \text{ mm}$. This was equivalent to a PMT entrance window. The exact assembly (see Fig. 7, left) was made with parallel- coupled four-arrays, each with a 2×2 MicroFC-60035-SMT, the latest (at that time) C-Series SiPM with a $35\text{-}\mu\text{m}$ microcells (pixels). After a successful test with SiPM

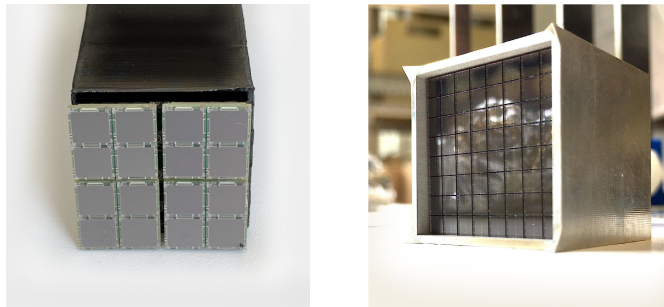


Figure 7: Left: the first version of SiPM readout with SensL C-series $35 \mu\text{m}$ pixel size sensors. Right: a new generation SensL J-series sensor with $20 \mu\text{m}$ pixels size, having no dead edges on individual SiPM's and reduced gaps between the pixels. Resulting in substantially higher pixel density and in a better dynamic range.

readout, we decided to use the SensL J-series arrays (see Fig. 7, right) for further modules. With the new sensor array ARRAYJ-30020-64P-PCB, we have an 8×8 array with $3 \times 3 \text{ mm}$ SiPM MicroFJ-30020-TSV each with $20 \mu\text{m}$ pixel [35]. With this configuration, the desired pixel number is reached. We also improved mechanical issues for the module assembly.

Figure 8 shows a Computer-Aided Design (CAD) drawing of the second generation LYSO-

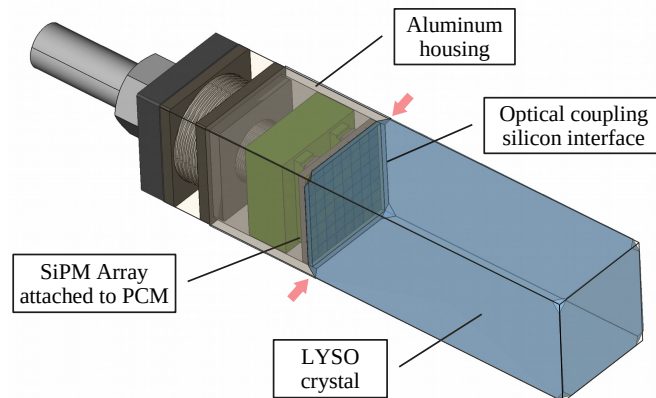


Figure 8: Module design for the LYSO coupled to the SiPM array.

SiPM module. To improve mechanical stability, the edges of the crystals are chamfered and pushed against aluminum housing, shown by the red arrows on Fig. 8. All corners of each crystal are chamfered to allow for the future possibility to flip the crystals and double the lifetime.



Figure 9: LYSO-SiPM module before and after assembly. Module ingredients are also shown. With the red square, the silicon interface is exposed.

In Fig. 9 all ingredients (except the white Teflon sheet) and the assembled module are shown. In total, we have build 52 modules.

After assembly of the module, the laboratory test for quality assurance is made. The testing procedure includes light-tightness and signal recording with internal end external radiation. If the module is healthy.

3.4 Current target

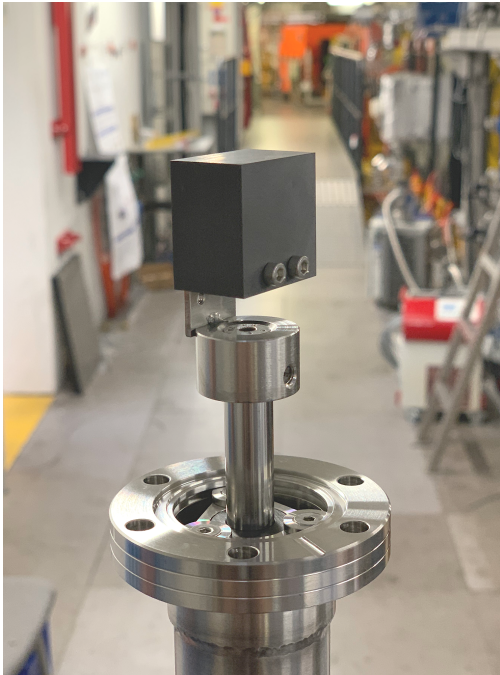


Figure 10: Current carbon block target used in detector, sizes are 2x2x3 cm.

Currently the block target system is used in the detector. Two block targets with size 2x2x3 cm, each on vertical and horizontal axis (Figure 10). As already mentioned the beam is cooled, its physical size is reduced and characteristics improved by this technique, but in case of solid block targets the target can not go in the beam, the position of the target is adjusted to be very close to the beam but not actually touching it, otherwise it will destroy the beam. The beam must be extracted, so only small amount will interact with the target, this is done by "heating" the beam, basically changing the shape of the particle bunch to incise the beam profile in one dimension by applying white noise to the beam.

Depending on the measurement type either vertical or horizontal target can be moved at predefined position or new optimal position can be automatically found by system, this can be useful when beam trajectory is changed for any reason. Dedicated hardware and software is used to control the target system.

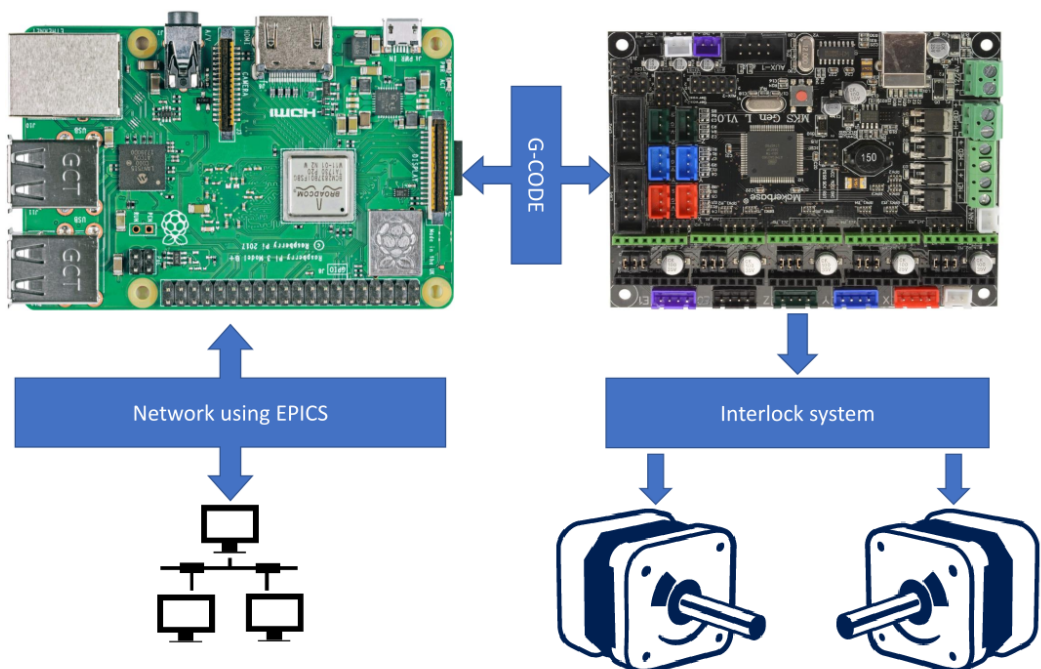


Figure 11: Block target control diagram

The targets are operated by stepper linear actuators, but they cant be used directly because of the vacuum in the accelerator. Special magnetic coupling devices are used to manipulate targets in high vacuum side of the accelerator, the tube which has two moving magnets, one inside the tube and other from the outside, moving outer magnet causes movement of inner magnet, by this system we can control targets inside the vacuum Figure 12. Industry standard G-Code interface is used to drive stepper motors with exact coordinates. As the detector and the targets are in remote place, network interface is used for communication. The Raspberry Pi [39]., which runs EPICS [38]. server and does communication with network and dedicated GUI software and MKS Gen L Board [40] which is a hardware to control motors with G-codes, there is a 8 bit Microcontroller Unit (MCU) on the board with "Marlin" firmware [41], which is generally used for 3D printers, but edited and properly configured version of this firmware can also work for this purpose (Figure 11). The stepper motor has built-in lead screw, it has 200 steps per full revolution so linear movement resolution is 0.04 mm per step (1.8°). Smaller resolution can be achieved by using so called "microstepping", in this case we use 1/16 step, so resolution is $2.5 \mu m$ in current configuration the nut is not spring loaded, changes in direction will result in loss of positioning precision due to backlash (lead screw to carriage nut coupling inaccuracy). Safety must be considered when working with ultra high vacuum system, if something goes wrong with targets, for example if they collide with each other, that will cause lots of problems. To avoid this situation both, software and hardware interlock systems are used. The hardware interlock system consists of optocoupler mounted on frame of target mechanism and light blocking plate is mounted on moving part of the target Figure 13. This way we can determine when target is at "home" position, unfortunately for now there is no position feedback in the system, each measurement is relative to "home" position. When the system is started "homing" calibration is done, after which it can calculate exact locations of target. In case, if something happens and target is mechanically moved for some reason, the change cant be detected, at this point the interlock system will activate and the power to the motors will turn off.

The Experimental Physics and Industrial Control System (EPICS) control system is used to exchange data and commands over network as this system is widely used in COSY accelerator environment and its well tested, we can integrate target in other systems and vise versa. The EPICS server which is running on Raspberry PI has database of Process Variable (PV) variables which are used to control and monitor target system, each of these variables are also archived for later analyses and inspection if something goes wrong. The

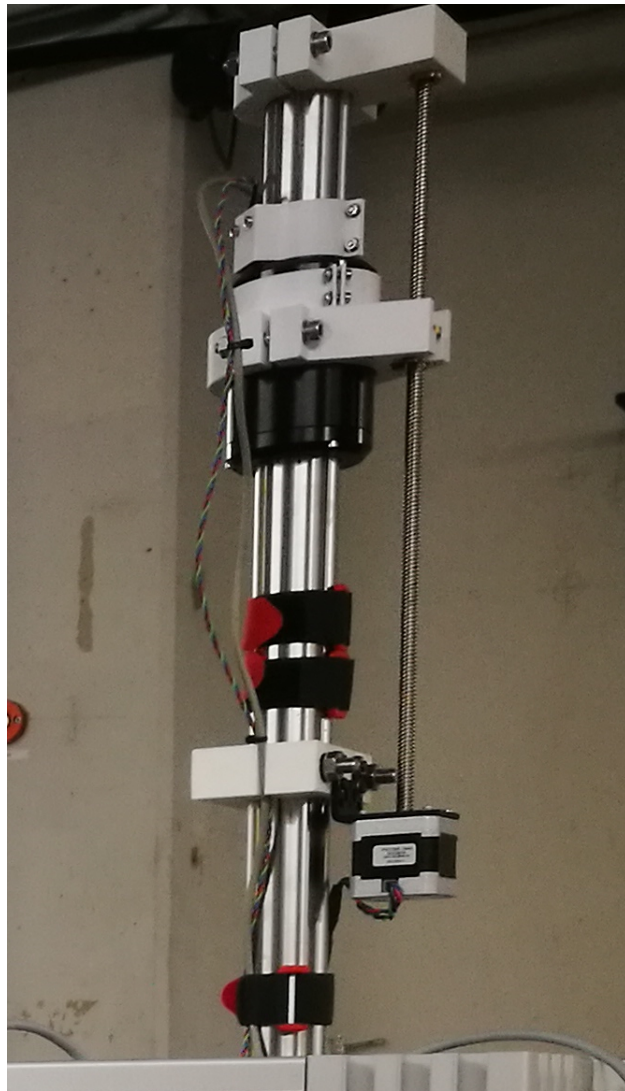


Figure 12: Block target mounting. The stepper motor moves outer magnet (black part on the rod) which is coupled with inner magnet and target

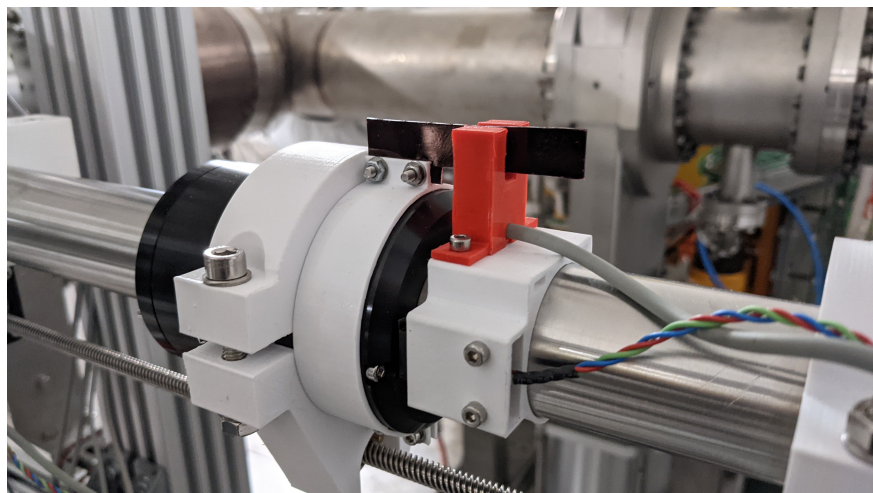


Figure 13: Block target hardware interlock system

task of this server is to maintain connection between client [GUI](#) applications (can be several) and hardware (motor driver board). It has also several safety functions such as software interlock and move targets to safe place if server crashes or connection is lost because of some

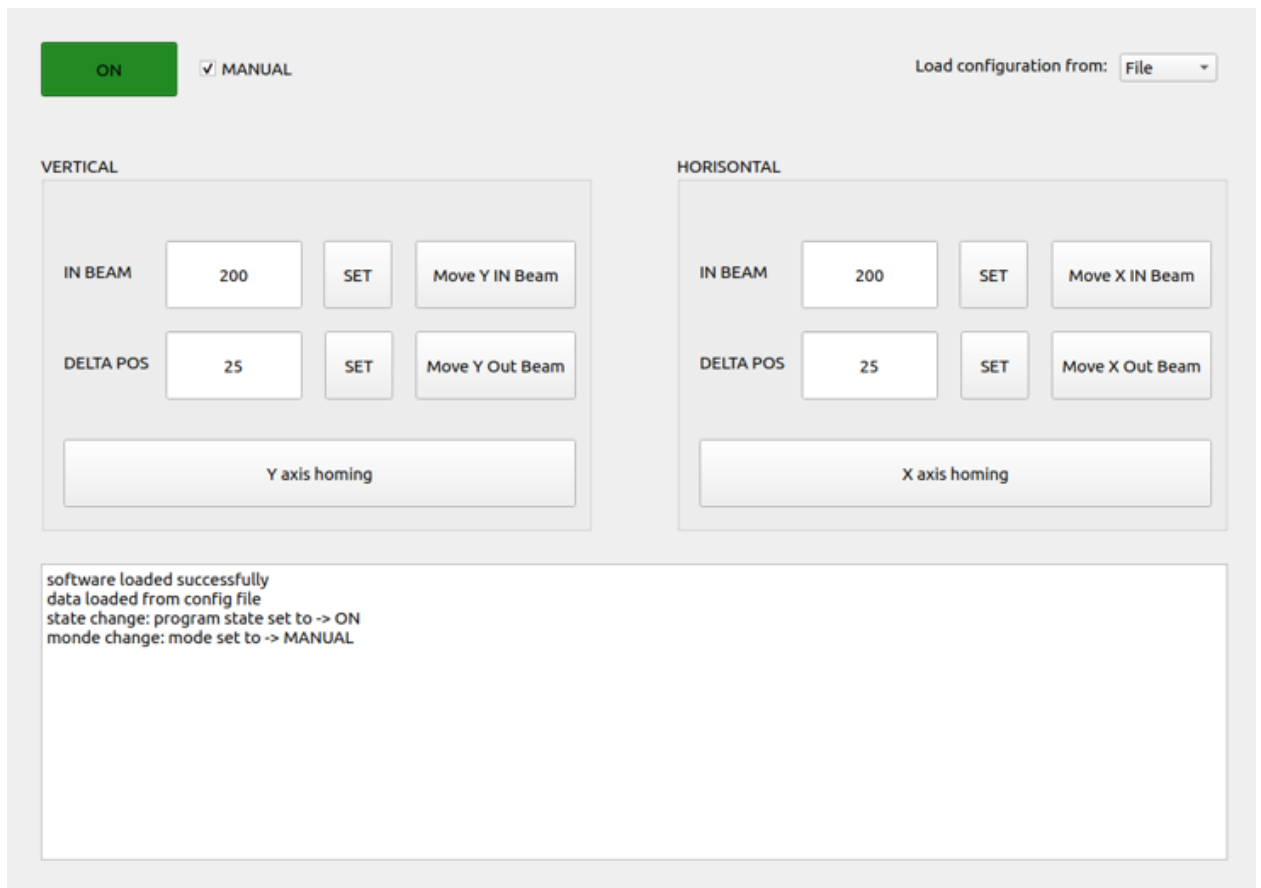


Figure 14: Block target control software.

network error. Dedicated GUI software (Figure 14), written on Python is used to control the target. For proper operation first correct positions of targets must be determined, this can be done manually or automatically using feedback from detectors count rate. After setting the variables they are saved in EPICS system and can be read for any other purpose. The server and the GUI software are event based so any change in PV variables will have appropriate action. The software takes care of software safety interlock system too (completely separate from hardware interlock). In operation mode GUI software has automatic and manual operation modes. The manual mode is straightforward, user can move target any time during accelerator cycle, but in automatic mode, predefined target will move only at predefined positions and movement is commanded by timing software which runs on other computer and synchronises different systems by telling each system when they should turn on or off (in our case when to move target in or out) according to predefined timing settings.

3.5 Dedicated Multi-channel Power Supply

At the time when the JEDI collaboration decided to develop a dedicated polarimeter for the EDM search, no multi-channel power supply was readily available on the market that

could provide low output noise level, fast dynamic load, high short-term and long-term voltage stability at the same time, which is needed for an effective operation of the **JEDI** polarimetry [86].

In our project **SiPMs** are operated with voltages higher than their breakdown voltage. In this mode the **SiPM** gain is roughly proportional to the overvoltage value (difference of the applied reverse voltage and the breakdown voltage). However, we tested our **SiPMs** in the laboratory to study this behaviour and also check their characteristics at high overvoltage values Figure 15.

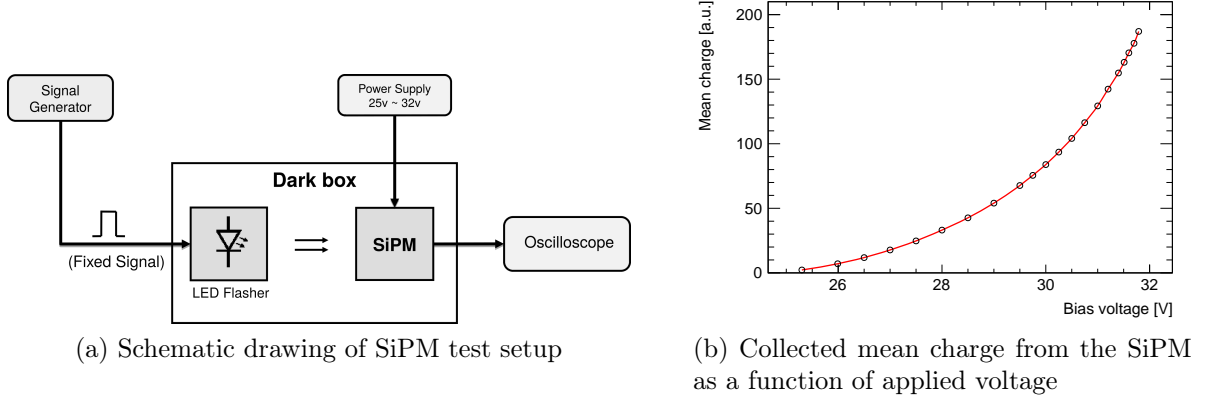


Figure 15: Test setup for SiPMs (a) and obtained result (b).

As it becomes clear from Figure 15 the output signal, strongly depends on the biasing reverse voltage. Higher gain can increase output signal which will result in a higher energy resolution of the calorimeter modules, but increasing voltage increases internal noise too [84]. Besides, the energy resolution of the **LYSO** crystals used in the calorimeter is also limited to about 0.5-1 % [45, 42] and there is no more benefit from the increase of the **SiPM** gain too much. As an optimal working voltage range we chose 27 V up to 31 V where 1 mV voltage change in the supply voltage induces about 0.05 % change in the collected mean charge. Therefore, the overall instability plus noise of the power supply output voltage must be less than 10 mV, in order not to allow the overall energy resolution of the calorimeter to degrade due to voltage variations. The main parameters of the calorimeter modules and the requirements for the voltage supply are listed in the Table 3.1.

Extreme variations of the **SiPM** load current present another challenge for the load regulation of the voltage supply. In the steady state our **SiPM** arrays consume just few hundreds of μA , whereas in case of the detection of a 270 MeV particle the peak output voltages reaching 2 V on the 25Ω loading resistance. This corresponds to 80 mA of peak current through the SiPM array, operating at 29 V. Voltage must be adjustable to match the gain of different

Quantity	Value
Impedance of SiPM array	25 Ω
Output signal parameters:	
Decay constant of the rising edge	≈ 25 ns
Decay constant of the falling edge	≈ 1.3 μ s
SiPM bias voltage	27-31 V
Maximum overall instability of the SiPM supply voltage	≈ 10 mV

Table 3.1: Table lists the main characteristics of the calorimeter modules.

SiPM modules. Therefore, the power supply needs to be modular with as many channels, as there are around 200 separate detector modules in the detector. Further requirements include remote on/off switching, voltage adjustment, current and temperature monitoring features.

Considering the above-mentioned requirements, we developed the new power supply modules based on a linear voltage regulator. Apart from its simplicity and reliability the output voltage is free from high-frequency spikes characteristic for DC-DC converters.

3.5.1 Power supply upgrade and improvement

During the Phd project, power supply has been updated as well. Several components has been identified to have big influence on performance, also the pre regulation part of the power supply has been developed and assembled.

The power supply system used laboratory power supply as a pre regulator. For full standalone solution we also developed dedicated pre regulator, which is also using linear regulator to avoid high frequency noise in the final regulated voltage. During power supply assembly we were unable to assemble the pre regulator too, but as a side project of my PhD the pre regulator has been assembled. Which can be seen on Figure 16

The mains power goes into toroidal transformer, after which the reduced voltage goes into the pre regulator. The system uses linear regulator LM317HV[72] and high current pass transistor TIP36[73] to regulate voltage for power supply modules. IRFZ34[74] is used for safety system to shut down the power supply. Other linear regulator made with transistor 2N5190G[75] and two 1N5525B[76] zener diodes are used to generate stable 12 V for reference board. The pre regulator board has several safety and control features such as: in rush current, over voltage, over current, under voltage and short circuit protection. Over current threshold can be adjusted using trimmer potentiometer on the PCB. In case of the failure of

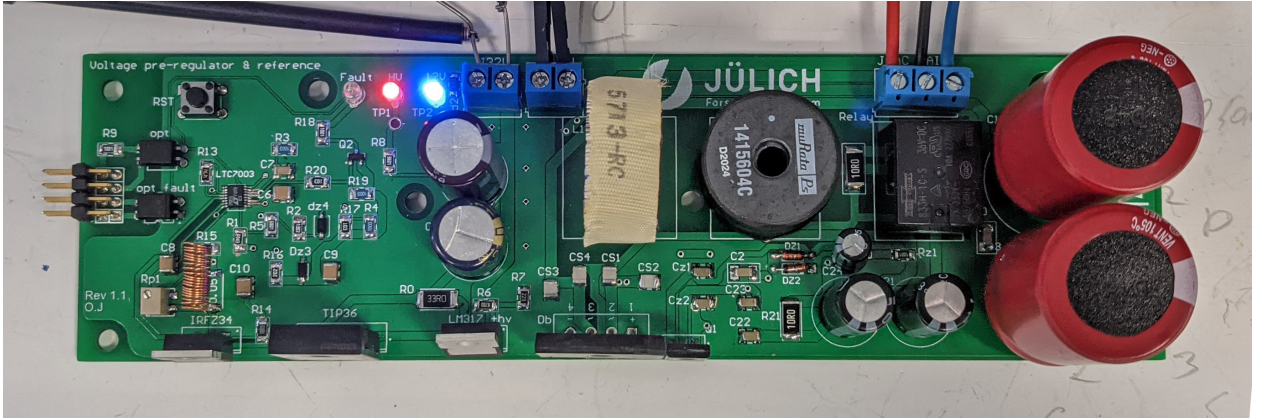


Figure 16: power supply pre regulator

any system the supply is shut down and alarm signal is generated for control system, which is optically isolated from power supply. To restart the supply one can do that using control computer or via manual switch. These safety features are implemented using LTC7003[77]. Inrush current protection is implemented using relay and series current limiting resistor, which is connected in series to the large capacitors, the relay is off until there is enough voltage on the capacitors to turn relay on and the series current limiting resistor is bypassed.

After assembly of the PCB several tests were done, short circuit, over current protections has been tested. Noise level was also measured using Tektronix MDO3054 oscilloscope [81] with 20 Mhz bandwidth (see Figure 17) The main source of noise is rectified 50 Hz noise, which can be seen on the spectrum, marker 'a' and marker 'b' are 100 and 200 Hz accordingly. The peak to peak noise is $\approx 2mV$. Although the results seems good, pre regulator system must be further investigated for different parameters, for example long term and temperature stability.

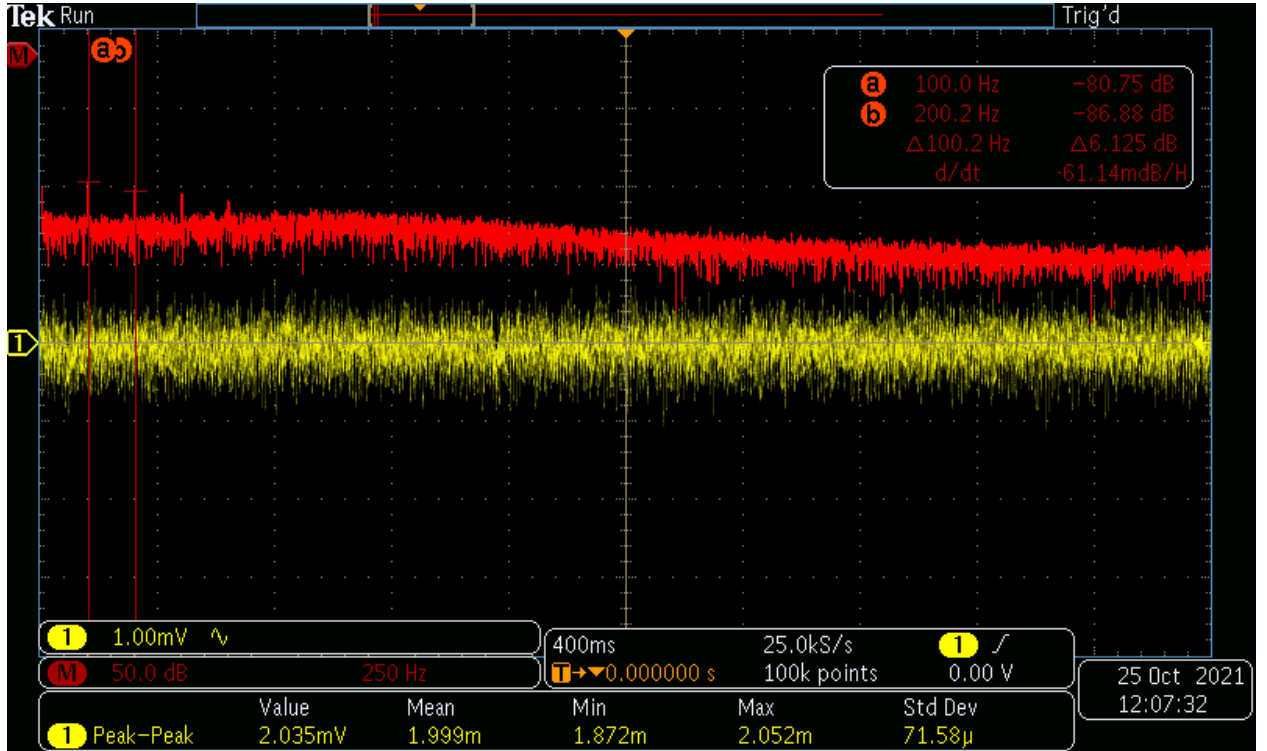


Figure 17: noise level of the pre regulator output.

The power supply modules were carefully examined during the test-experiments of the polarimeter, we record the data to further analyse performance and improve some of the characteristics. In general, the performance of the power supply was good, but we noticed some instabilities which needed to be investigated.

Based on observations main reason for voltage instability was the change of the environmental temperature it showed a strictly periodic behaviour associated with day-night temperature cycles. This was later proved to be true by investigating the ambient temperature using digital thermometers and correlating the temperature and voltage data (Figure 19):

For further investigation a temperature chamber has been built with temperature range from 15°C to 35°C at a room temperature of about 23°C.

Based on tests the voltage reference temperature coefficient is to be around 4 $\mu\text{V}/\text{K}$ at 5 Volts (0.8 ppm/K). The power supply module with the voltage reference was measured to have a temperature coefficient of about $\approx 3.4 \text{ mV}/\text{K}$ at 28 Volts. After analysing the schematics and identifying the components which had the most effect on the temperature coefficient some improvements were made which involved changing those parts with more stable substitutions, which significantly increased overall temperature stability.

After upgrading the power supply modules, a scan was performed to measure the result-

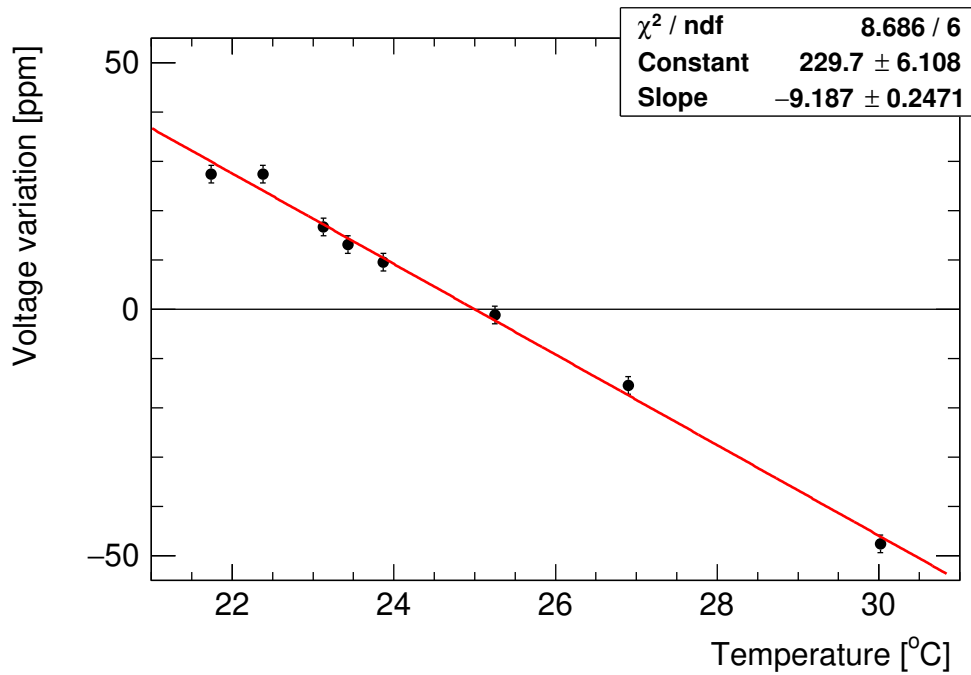


Figure 18: Temperature dependency of the power supply module after the upgrade.

ing temperature coefficient. As demonstrated in Figure 18 the resulting thermal stability was improved by more than an order of magnitude; the temperature coefficient of one particular module under test was changed from $+3.4 \text{ mV/K}$ to -0.25 mV/K at 28 Volts (from $+120 \text{ ppm/K}$ to -9 ppm/K). The above mentioned final numbers turned out to be typical values also for all other modules, as demonstrated in Figure 20. More details on this topic can be found in my Master's thesis and paper [82], [83].

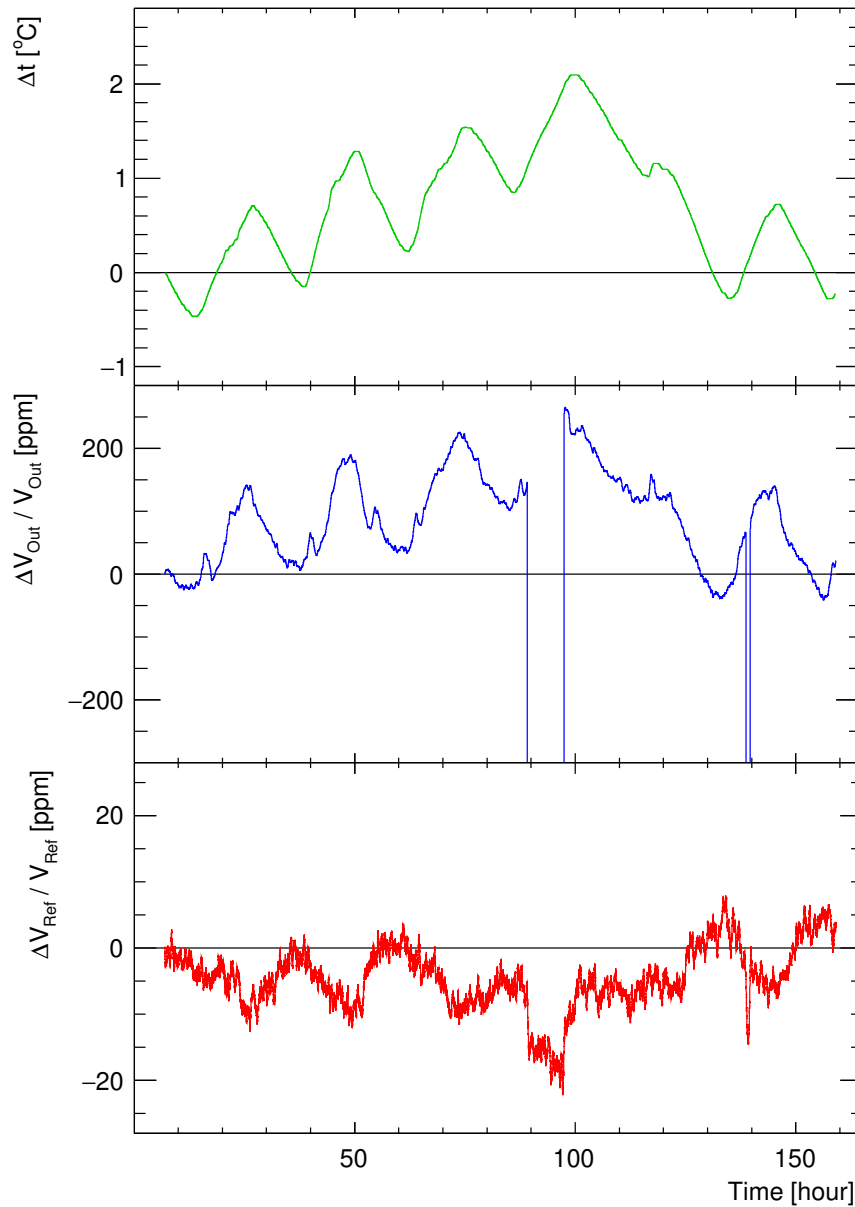


Figure 19: Voltage stability as function of time. The output voltage of one of the power supply modules is shown (middle) together with the reference voltage (bottom) in parallel with the ambient temperature recording (top). Note that the drops in the output voltage are caused by turning the power supply modules off. The reference voltage source remains turned on all the time.

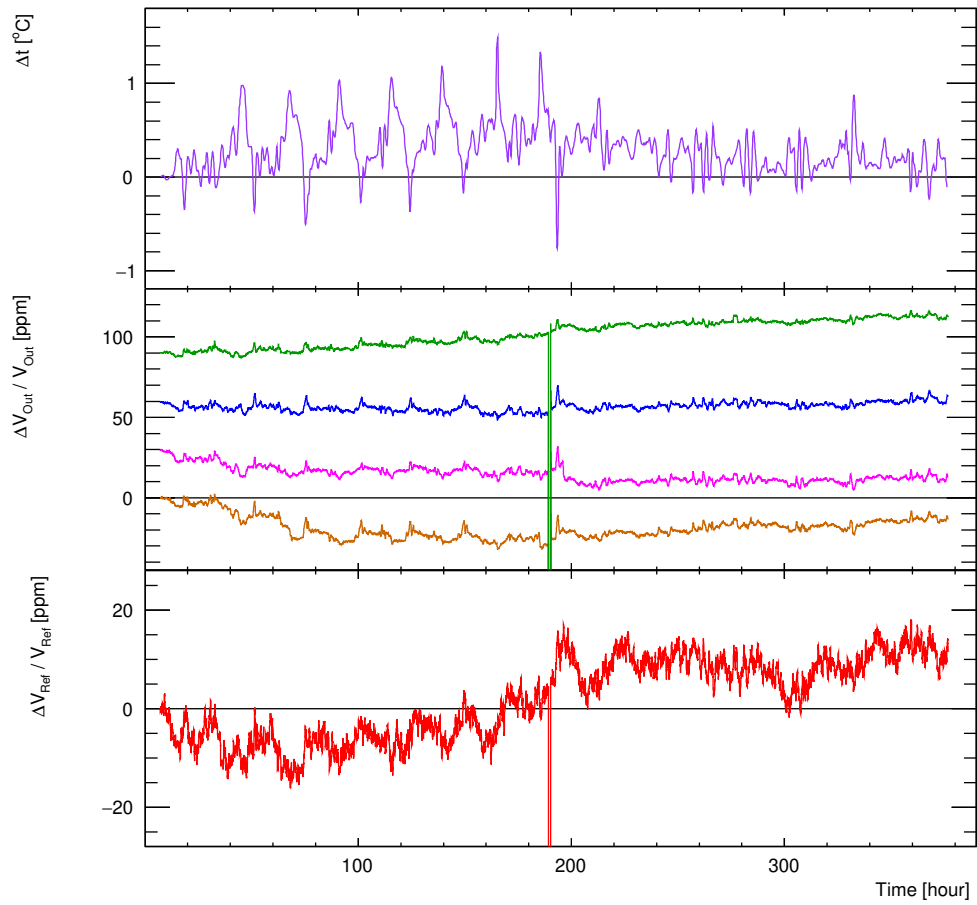


Figure 20: Voltage stability of the upgraded power supply. The output voltages of four typical power supply modules are shown (middle) together with the reference voltage (bottom) and the ambient temperature recording (top). Note that the whole power supply was off during some period of time. This is indicated by a drop in the output voltages at around 190 hours.

3.6 Data Acquisition and Readout

Very important part of the polarimeter is its advanced readout system based on modern fast high-resolution sampling [ADCs](#). The entire readout electronics consists of 250 MSPS, 14 bit [ADCs](#) from Struck [\[37\]](#) with a synchronized clock between modules and a high-speed network readout running at 1 GBit/s per module (16 channels). [ADCs](#) are directly read by the dedicated powerful server computer which is already in use. It has multiple [CPUs](#), which are multicore Intel Xeon server. A Linux based system is used to store and analyse online and offline data. To reduce the amount of data transfer each signal carries a time stamp and is divided into eight different integrals so data rates are reduced from several thousand samples to just eight integrals at precisely chosen times relative to the individual threshold crossing time for each channel. All this happens directly in the onboard [FPGA](#) chip [\[42\]](#) [\[34\]](#).

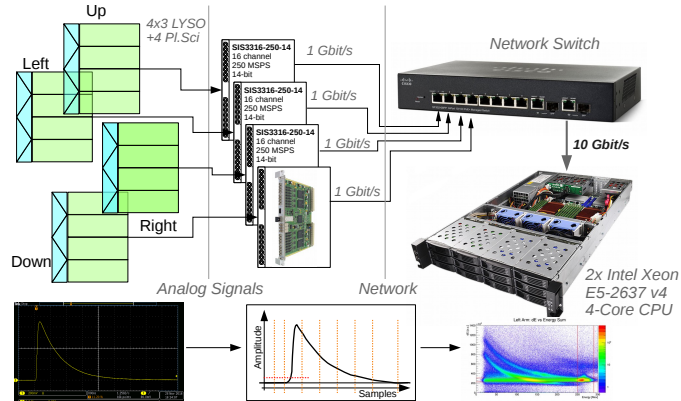


Figure 21: Data acquisition system for the dedicated polarimeter. The connection between the experimental area and the detector is with a 10 Gbit/s optical link.

Dedicated software is being developed for the polarimeter data acquisition and online monitoring of the results. It is partially based on CERN ROOT [\[50\]](#) libraries. Being highly configurable, it is also capable of running on different machines, providing client-server-like functionality. In the final configuration of the polarimeter around ten Flash [ADC](#) ([FADC](#)) modules will be employed. The most beneficial way to use these modules is to have them self-triggered. Besides being very efficient with storage space, such a configuration can achieve much higher counting rates without noticeable dead times. It also allows for much better precision in relative time measurements between the channels thanks to the built-in hardware features. However, the reconstruction of the physical events is highly complicated in this configuration due to random sequences of different channels in the delivered data stream. Recent development addresses this challenge by employing a multi-threaded approach to sorting the data in real time using the precise timestamp information. Individual thresholds for all channels can be adjusted using a [GUI](#) or by using an automatized procedure that

in the future will take into account online information about the elastic peak position and adjust the fixed energy cut position for every module.

Typical Spectra

Single-event spectra for a row of calorimeter detectors are shown in Fig. 22. Each spectrum

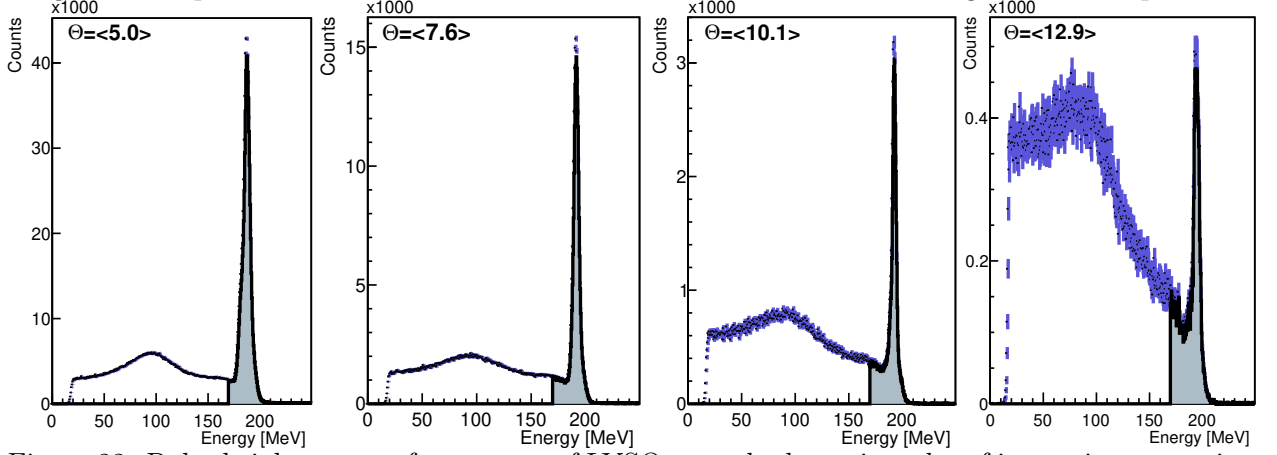


Figure 22: Pulse height spectra for one row of LYSO crystals shown in order of increasing scattering angle. The filled area indicates the fixed hardware threshold used during the event trigger. The cross section weighted scattering angle is also given for each spectrum.

shows two features, a narrow peak at high pulse height that represents elastic deuteron scattering from carbon and a broader peak at lower energy that is due mostly to protons from deuteron breakup as well as a low-energy tail on the elastic peak. In addition to the LYSO crystals, there was also a general-purpose energy-loss scintillator mounted in front of the LYSO array. The resulting 2-D array is shown in Fig. 23. The most prominent peak

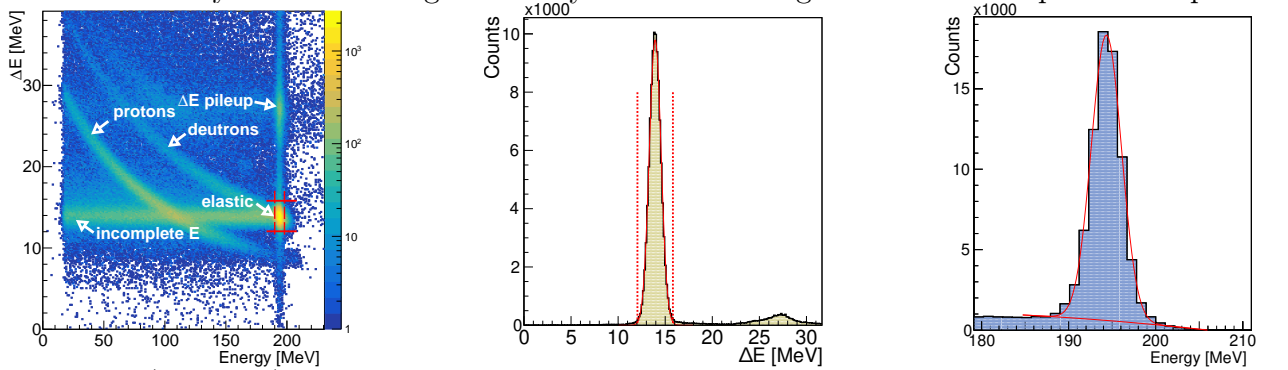


Figure 23: (left panel) 2-D histogram of events as a function of LYSO pulse height on the X-axis and energy-loss (ΔE) on the Y-axis. The vertical limits marked in dashed red determine which range ($\pm 3\sigma$) is used for the elastic projection. The horizontal limits marked in red determine which events are recorded for further analysis. (middle panel) Projection of the ΔE scintillator in the region of the elastic peak. (right panel) Projection of the selected events on the LYSO crystal energy axis. A Gaussian shape with a linear background is used to illustrate the deuteron elastic peak. The sum for this feature without background subtraction is used as the primary data stream for determining polarization, as illustrated in Fig. 22.

in the left panel is from elastic scattering. Tails may be seen running parallel to both axes. Events in which the deuteron interacts with the LYSO and loses energy make a line going to the left. Similar processes including pileup in the energy-loss scintillator account for the

vertical band. A weak enhancement may be noted at double the energy-loss value for elastic scattering due to two ΔE coincident events within the same time window. The curved arc starting from the elastic scattering peak represents inelastic deuteron reactions in the carbon target. A nearly parallel arc just below it is due to protons. Midway along this arc is the main group representing protons from deuteron breakup in the carbon target.

For normal operation, a window may be placed around the deuteron peak in this spectrum in order to generate a cleaner deuteron pulse height spectrum for actual polarimeter peak summing. Such a spectrum is shown in the right-hand panel of Fig. 23. This peak sum is the primary piece of data used to determine the polarization. During normal operation, all events that pass the trigger threshold are (see Fig. 22) kept for the polarization measurement. Background subtraction as seen in the right-hand panel of Fig. 23 may be completed offline for more reproducible results.

3.7 JePo Installation at COSY and Spin Response

The polarimeter is already installed in the COSY ring. A 3D drawing of the polarimeter and its position in the accelerator ring is shown in Figure. 24. The main parts of the assembly

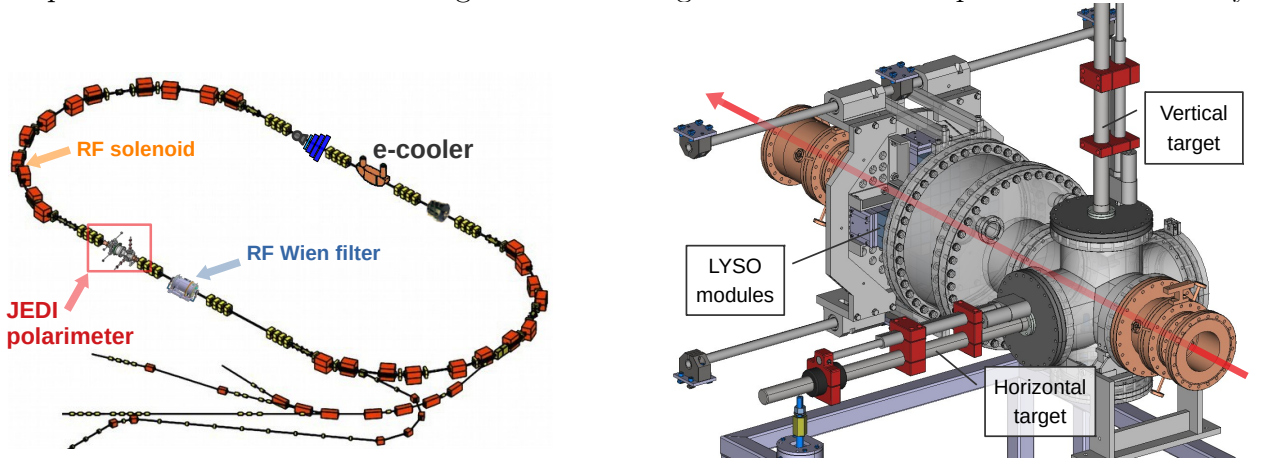


Figure 24: Left: The COSY storage ring (circumference 184 m) The beam enters from left bottom part of the diagram and circulates in a clockwise direction. The additional beam pipe is for an extracted beam. Right: drawing of the polarimeter. The beam, indicated by the red arrow, enters from bottom right side. The orange adapter flanges at the front and rear are planned to contain Rogowski coils to provide the X and Y beam position. The 6-way cross contains two flanges that hold movable targets. This is followed by an expansion chamber that ends with an $800 \mu\text{m}$ stainless steel exit window. Thus the detectors are in air. The LYSO (blue) crystals are mounted on two movable tables. The energy loss (ΔE) detectors are not included in this drawing, but would appear in front of the LYSO calorimeter.

are described in the figure caption. The length of the assembly is 1.48 m including the space for Rogowski coil beam position monitors [95]. The assembly is mounted in a special frame to align it to the line, as shown in Figure. 25.

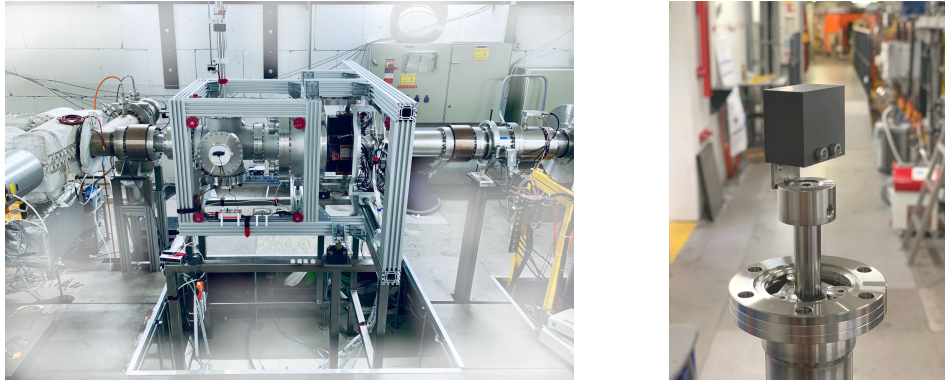


Figure 25: Left: The assembled polarimeter in its place in the COSY storage ring. The beam goes from left to right. Right: A graphite block target ($2 \times 3 \times 3 \text{ cm}^3$) mounted on a movable rod. The beam would go about 3 mm above the top face of the carbon block.

All 52 **LYSO** modules of the detector were arranged into four groups, one crystal was added along the diagonals in the corner where the four groups met, leaving a 3×3 crystal space open in the middle (see Figure 3).

For the first commissioning run the polarized deuteron beam was injected into the COSY ring and accelerated to $970 \text{ MeV}/c$ or 238 MeV , which is an energy commonly used for other COSY polarized-beam experiments. Three polarization states were available on a cycling basis, vector polarization up and down as well as unpolarized. These were created at the atomic beam polarized ion source using either a weak field transition or a combination of two strong field transition units [96].

The electron cooler was used for 75 s at the **COSY** cycle start. After that a 2 cm thick carbon (1.7 g/cm^3) block target was inserted from above until the bottom face was aligned with the beam center line. Prior to this, an orbit bump was created that moved the beam off-center at the target position. When data acquisition was enabled, white noise was applied to a set of vertical strip line plates to increase the vertical emittance of the beam and bring deuterons close to the target where particles can interact with it. The magnitude of the white noise was controlled in a feedback loop that maintained the counting rate in the polarimeter detector. The data acquisition phase operated for 120 s. Most of the beam in each store was eventually lost onto the polarimeter target.

The transfer line between the JULIC cyclotron and **COSY** contains a scattering chamber used to determine the polarization of the beam. A thin carbon rod mounted at the center is the target. Around the outer edge are ports used for a collimation system and scintillation detectors. At 40° the singles spectrum shows a clear elastic scattering peak that is easy to separate from other background reactions. Detectors were mounted at this angle in the left, right, up, and down directions. The left-right pair were used to measure the vector

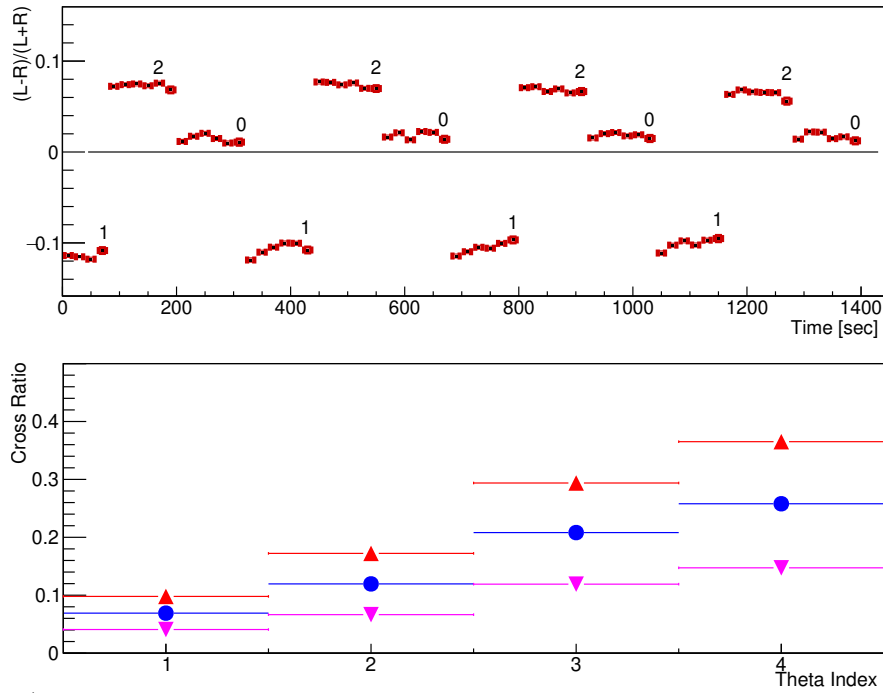


Figure 26: (Top) Raw asymmetries from a series of beam stores, in which the polarization cycle changes from negative (state 1) to positive (state 2) and then finally unpolarized (state 0). Only the data taking portion is retained. (Bottom) Asymmetries calculated for each column of three LYSO crystals in order from those closest to the beam to those farthest away. The asymmetry values depicted in blue were calculated using a cross-ratio method applied to the two polarized beam states. The red and magenta values represent half-cross-ratio calculations based on the negative and positive polarization states, respectively, compared to the unpolarized state. Only the magnitudes are shown.

polarization. The asymmetry for each polarized state, given by $\epsilon = (L-R)/(L+R) = \frac{3}{2}p_y A_y$, was compared with the asymmetry for the unpolarized state. The difference was assumed to be due to the beam polarization. At this angle and energy, the elastic scattering analyzing power is $A_y = 0.61 \pm 0.04$ [97]. The differences between the polarized and unpolarized state asymmetries for the two polarization states were $\epsilon(1) = -0.509 \pm 0.012$ and $\epsilon(2) = 0.178 \pm 0.012$, yielding polarizations of $p_y(1) = -0.550 \pm 0.013$ and $p_y(2) = 0.192 \pm 0.013$ with no contribution for the scale error of the calibration [97]. The statistical errors given here are smaller than the systematic error associated with the calibration of the analyzing power.

Figure 26 illustrates the response of the polarimeter in two different ways. The polarization of the beam changes in each cycle. The absolute value of the raw asymmetries decreasing within the cycle (120 s). A small imbalance between left and right counting rates (due to either a steering or an alignment problem) results in all three asymmetries shifting upward by about 0.015. For this reason the average of the unpolarized measurements should be taken as the location of zero asymmetry.

The difference between the unpolarized and negative asymmetries may be used to deter-

mine the analyzing power of the polarimeter. The difference of -0.125 suggests a value of $A_y(\text{polarimeter}) = 0.15 \pm 0.01$. This small value when summed over the entire left and right detector arrays reflects the heavy weighting given by the rates to the response of the first column of **LYSO** crystals by the small angle elastic scattering cross sections.

To have the most efficient **EDM** measurement the polarimeter must extract the most information about changes in the polarization. This efficiency is defined as the ratio of the number of events used to calculate the polarization to the number of beam particles consumed by an interaction with the polarimeter. In ideal case, all the stored beam particles should interact with the polarimeter target.

During the experiment, the beam was bunched and its current was monitored by a current transformer. Typical fills contained roughly 10^9 deuterons at the end of the electron-cooling time. The current transformer output was recorded continuously. In parallel, the count rate for the polarimeter detectors was also recorded.

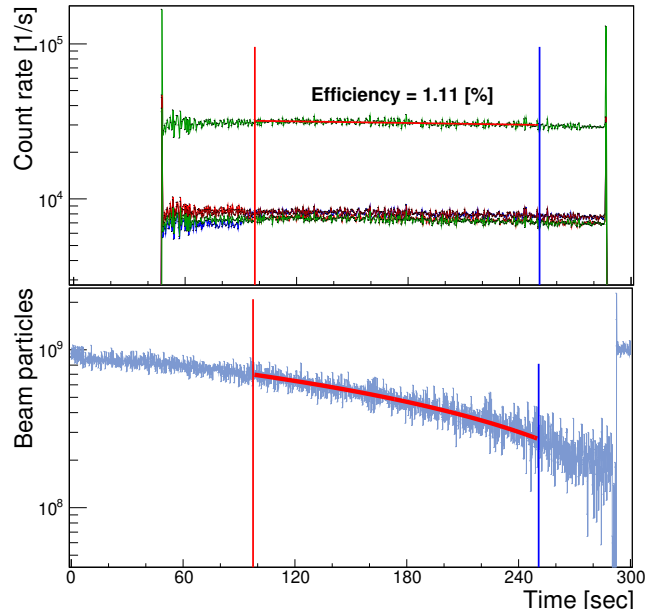


Figure 27: Part of the online logging system output for polarimeter runs. The counting rates for the four quadrants of the polarimeter appear on upper panel that are nearly flat for the data acquisition period. The green trace shows the summed count rate. The start of beam extraction onto the target generates a spike in rate. The blue trace in the lower panel shows the declining stored beam intensity. Times are shown along the horizontal axis in seconds.

Sample data are shown in Figure 27. After the start of data acquisition the white-noise is applied to the beam that brings particles to the polarimeter carbon target. The count rates are regulated through a feed-back loop to the white noise generator, keeping it steady during the acquisition time. The sum of the count rates and the loss of the beam may be read for any desired time interval. The ratio of total events within a time interval marked by the red and blue vertical lines divided by the loss of beam particles for the same interval

is about 1.1 %, which is within the requirements for an EDM polarimeter. The efficiency calculation assumes that there are no additional beam losses in other parts of the storage ring.

Chapter 4

Ballistic Pellet Target

4.1 New concept development

The practical implementation of [srEDM](#) involves many technical difficulties and challenges. For the [srEDM](#)-experiments, the polarimeter must monitor the change of the spin direction of the circulating beam for a long time ($> 1000s$). That is why only a small amount of the beam must interact in the polarimeter at any given time, otherwise the stored beam would be lost almost instantly. This can be achieved either by extracting only very small part of the beam to interact with thick target or interact complete beam with very small or thin target.

The reaction-of-choice is elastic scattering of the beam particles (protons, deuterons) on a carbon target, since it provides high analyzing power and, important for practical purposes.

Two methods are commonly used for systematic error reduction of the measurement: (i) placing identical detectors on both sides of the beam, and (ii) repetition of the experiment with the polarization reversed. Both these techniques can be used together to get 4 independent measurements of the count rate to determine the asymmetry, which is the product of polarization and analyzing power. The cross ratio method cancels, e.g., possible intensity differences of the two polarized beam states as well as acceptance differences between the two detectors.

At [COSY](#), the Excitation function Data acquisition Designed for the Analysis of phase shifts ([EDDA](#)) detector was used in high sensitivity deuteron polarization measurements [32] to demonstrate that corrections could be made up to a level of 10^{-5} for deliberately large errors, which seems to facilitate real time observation of vector polarization changes smaller than 10^{-6} in a [srEDM](#) search. In this experiment, a carbon tube (1.5 cm thick along

the beam direction) with rectangular opening (2.0 cm in horizontal and 1.5 cm in vertical direction) through which the beam passed, was employed. The beam was steered towards the top edge of the block and additional “white noise” was applied to a pair of electrical field plates to increase the phase space of the beam, such that a fraction of it collided with the carbon. In the scattering a left-right asymmetry was created indicative of the polarization

The carbon block solution has a number of disadvantages: firstly, some active means of extraction of the beam onto the target is needed and secondly, there is no way of providing the information the the beam’s intensity and polarization profile. There have been suggestions to add a gas jet or a target comprised of a stream of frozen pellets (size some 30 μm) to the interaction region in order to drive the beam particles into the carbon block in a two-step process: first particles scatter from the gas or pellets, undergo some multiple scattering, and subsequently strike the carbon target. Although a hydrogen target would offer the possibility to sample the beam via tracking 2-prong events, gas targets are generally cumbersome, in particular for differential pumping. Cryogenic pellets might be an alternative, but need further consideration, since they may generate large energy losses or multiple scattering outside the aperture of the accelerator; they also produce unwanted rest gas in the vacuum chamber of the storage ring [33].

The polarimeter-of-choice will be based on beam-carbon scattering. The beam-target part of it must provide the following features: (i) a 2-dimensional polarization profile of the beam’s cross section, without any movement of the beam itself and be minimally destructive to the circulating beam, (ii) the possibility to switch the beam-target interaction on and off and facilitate a change of the interaction rate at any time of the measurement. It should also produce no rest gas, be non-cryogenic (i.e., operate at room temperature) and not require any external electric and/or magnetic fields.

Jülich Ballistic Diamond Pellet Target for Storage Ring EDM Measurements (JuDiT) will fulfill the above listed requirements. It will ballistically throw a single solid diamond pellet (diameter 10 - 100 μm) in vacuum repeatedly through the circulating beam by means of two shooter/catcher systems. Mechanical movement of the system will provide beam-profile information in one dimension, while precise timing (between shooting and catching) will give the second dimension. Moving the whole system along the beam might even allow a 3D-picture of the spin profile for a limited region in the direction of beam propagation. Since it is a solid target, the system will be non-cryogenic and free of rest gas, and the beam will only be affected along the tiny trajectory of the pellet. The interaction rate will be defined by the adjustable pellet velocity and the repetition frequency between shooter and

catcher. Finally, it is foreseen to switch the pellet movement on and off in order to define the polarization measurement cycles.

The velocity of the pellet of a few meters per second (5 - 50m/s) will be very small compared to the beam moving close to the speed of light: consequently, the pellet will produce a small tube in the beam bunch along which the interactions are taking place which adds up to a slice along the pellet trajectory

In practice, there will be no sustainable tube/slice without any particles in the part of the beam which has interacted with the pellet, since the slightly different trajectories of the individual particles will wash this out. Thus, the actual polarization of the almost unaffected beam will be permanently screened by the pellet. If the pellet trajectory can be controlled precisely (speed, repetition frequency), a scan of the beam, in particular its polarization profile, will be obtained.

The areal ratio (ϵ) is estimated to be of the order of 10^{-5} for a pellet of $10\mu\text{m}$ and a beam diameter of 2 mm. The luminosity – which is the product of (ϵ), the number of target nuclei N_t , the total beam flux $j = N_b f$ (N_b is the number of beam nuclei, f the revolution frequency) – together with an overall duty factor (ratio between times of beam-target overlap on and off, respectively) and the reaction cross section, determines the count rate in the detector. It must be large enough to achieve the required statistical accuracy within a reasonable measurement time.

In order to compare a single pellet with a wire of the same size, both crossing the beam with the same velocity, a straightforward calculation has been performed. The results of this calculation are shown in Figure 28, where the remaining number of beam particles on the y-axis is plotted as function of beam revolutions, i.e., the number of chances to interact with the wire or pellet (note that for a beam energy of 270MeV , the revolution frequency is $\sim 700\text{kHz}$; 1 s corresponds to $\sim 7 \times 10^5$ revolutions).

The obvious disadvantage of the wire is that the beam is lost much faster. In addition, there is no possibility for a 2D-polarization scan of the beam with a single wire. Experimental tests have been conducted with a wire ($10\mu\text{m}$ carbon fibre) moving across the stored circulating beam of COSY in order to demonstrate that the basic considerations given here are correct. The following oscilloscope picture 29 shows the effects of a wire on the count rate in the EDDA [32] polarimeter (top) and on the beam intensity (bottom) for 10 movements through the beam: while in the beam, the rate goes up and the intensity is reduced in a staircase-like fashion; since the wire passes the whole beam, the beam current is quickly reduced. Instead of using a wire, a hydrocarbon gas jet traversing the beam could be used,

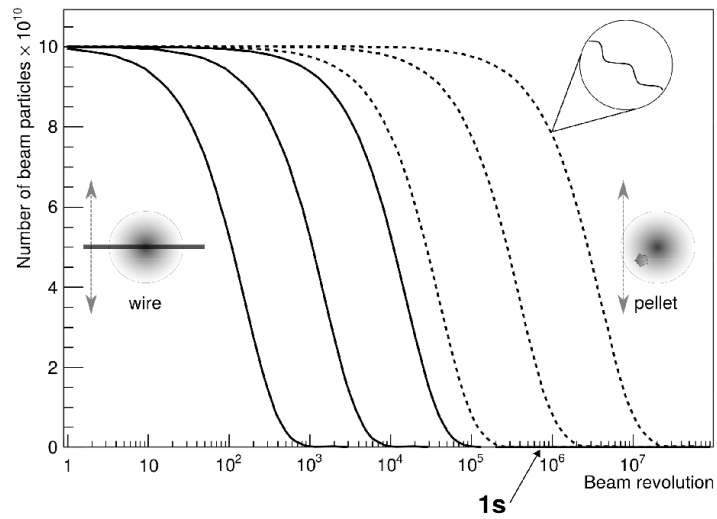


Figure 28: Results of a comparison between a single wire and a single pellet moving across a circulating beam. The three curves correspond to 100%, 10% and 1% interaction probability (from left to right) for each of the two cases. Due to the much larger beam-target overlap, the beam intensity is reduced much faster for the wire than for the pellet

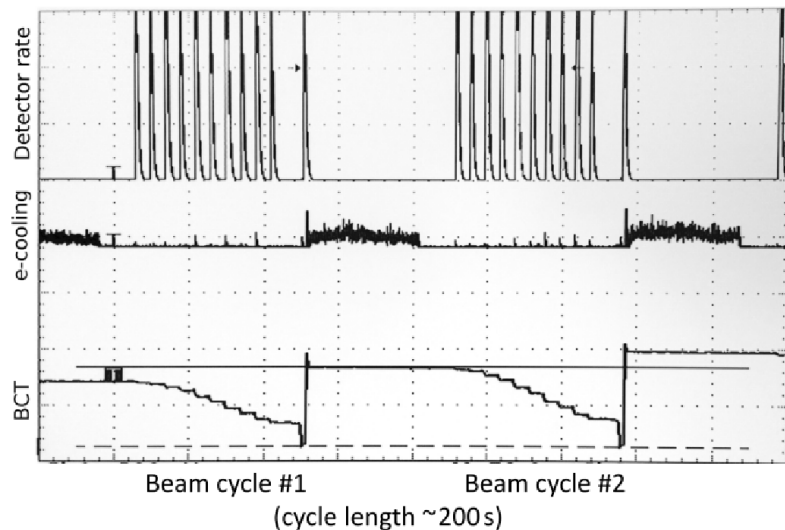


Figure 29: Results of an experimental investigation of the interaction of a wire with the COSY beam for two consecutive cycles: the top graph shows the rate in a detector, the bottom part the stepwise reduction of beam intensity for each beam crossing of the wire.

but this has at least two drawbacks: (i) the jet will expand and produce a background of rest gas in the beam pipe, and (ii) there will be a dilution factor compared to pure carbon because the jet contains H-nuclei. Thus, the method of choice is a μm -sized piece of carbon – because graphite is brittle and hydrophilic, the optimum solution will be a diamond pellet.

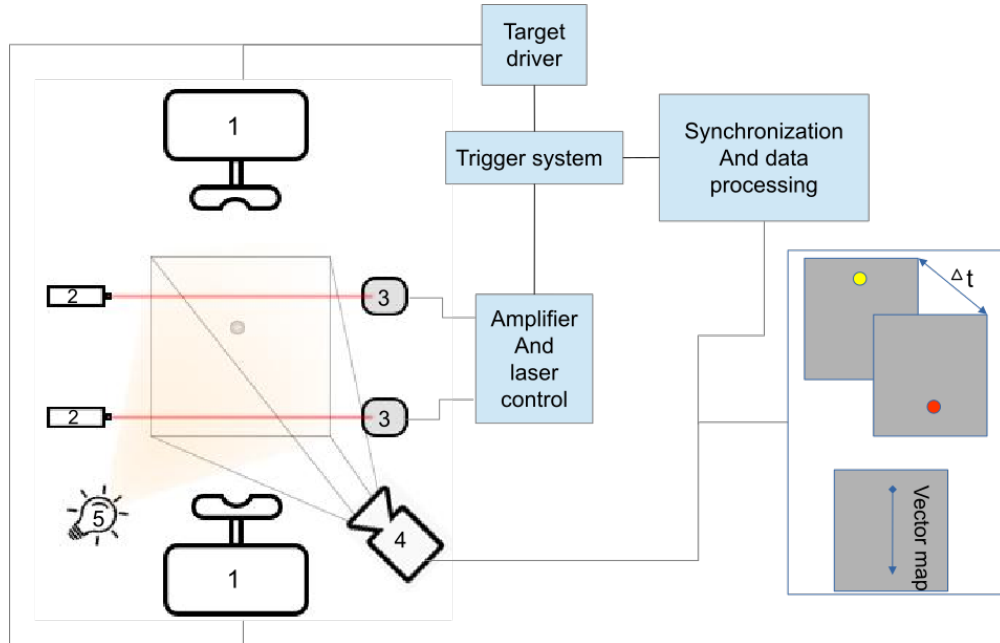


Figure 30: ballistic pellet target system diagram: 1 - throw-catcher mechanism, 2 - lasers, 3 - PIN photo diodes, 4 - camera, 5 - light source

The ballistic pellet target system consists of several parts which are tightly interconnected. The throw-catcher mechanism (Figure 30, 1) serves as actuators for pellet to oscillate it through the beam. A cycle starts with the pellet ejected from throw-catcher, then is captured by another throw-catcher below the beam. After a defined waiting time the pellet is ejected backwards. The complete throw-catcher system will be made movable perpendicular to the beam in order to scan its profile, the second dimension will be obtained from the timing of events relative to start/stop trigger system. It will also be desirable to have some movement capability along the beam direction and the possibility to rotate the system around the beam. In order to define the beam direction precisely, so-called beam position monitors will be installed in front of and behind the system. This mechanism needs precise timing and control, these information can be achieved by laser-photo diode precise, fast trigger system (Figure 30, 2 and 3), it provides as the information about trigger, both the start and the end of movement and it also calculates the TOF, but TOF cant provide precise tracking information, that's why camera with its light source (Figure 30, 4 and 5) is used, this is a high frame rate camera which continuously records frames and does image processing with object detection and tracking providing us exact information of pellet position. All

above mentioned systems need dedicated hardware and software support. The **TOF** system has separate board with precise high gain amplifier, signal filters and level converters. For data analyzing, synchronisation and decision making **FPGA** board is used. More detailed diagram can be seen on Figure 31. In this work the most concentration will be on electrical and programming parts of the system, excluding mechanical part.

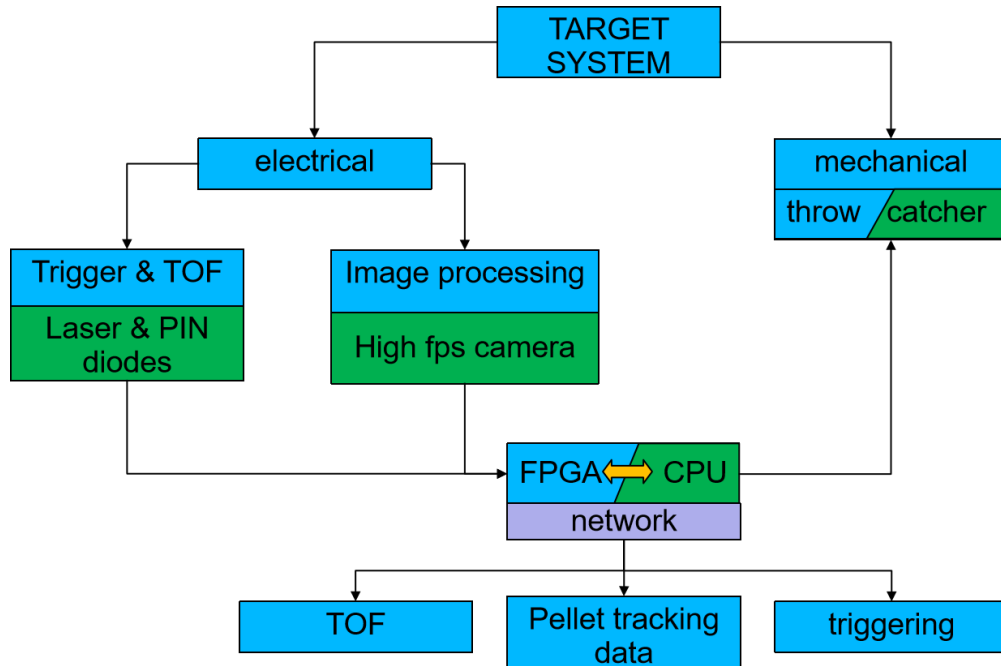


Figure 31: ballistic pellet target system diagram 2

4.2 TOF and Trigger System

The triggering and **TOF** system consists of standalone **PCB** with dual channel amplifier, precise, low noise power supply with bipolar output power rails, sensor interface, signal filtering, shaping and laser control circuits. The purpose of this system is to amplify small, several mV signal to appropriate digital level, in this case 3.3v. After amplification and filtering the signal goes into the **FPGA** board, which samples the time between start and stop signal with 450 Mhz and calculates **TOF**.

The requirements for the **PCB** (Figure 32) are to have high gain, very low propagation delay between channels, high stability and high noise immunity. Connectors on the left hand side are for PIN photo diode sensors, based on experiments with different photo diodes "HAMAMATSU" S1227-16 has been chosen [53]. The connectors on right hand side are for the output signal which goes to the **FPGA**, 2 blue screw terminal block on bottom right side are for powering the laser diodes, 3 way screw terminal on bottom left is to turn on/off laser diodes from **FPGA** system those inputs are isolated with optocouplers. The input power

is delivered to the board via 2 way screw terminal on right bottom side, the input voltage can be from 13 to 32 volts. The sensors - "HAMAMATSU" S1227-16, which are 1.1mm x 5.9mm high sensitivity PIN photo diodes, have the active size of the sensor further reduced by mechanically adjusting slit size to about 0.1mm, so new effective area is 0.1mm x 5.9mm, this is done because the output signal depends on the ratio between active area of sensor and the area which is covered with pellet target shadow. As a light source, the ideal case would be to use infrared laser, as the sensor is most sensitive in this region of the spectrum, but infrared lasers are harder to use compared to the lasers in visible spectrum and as sensitivity is not reduced drastically, using red lasers does not affect on signal amplitude too much. We use red lasers as light source, beam width is set to about 3.3mm which is adjustable by manually setting focus point of laser, for lab tests this size is enough, after hardware development, this can be reduced, increased ratio of light to shadow area will further increase the signal amplitude. Other way to adjust amplitude of the signal is by changing the gain of the amplifier. Schematics for one channel of the amplifier is shown on Figure 33. The connector J1 is for sensor, the sensor is in reverse bias configuration and maximum voltage is 5 volts, as the sensor is very sensitive to voltage, separate independent linear power supply is used for reverse bias voltage, coaxial cable is used to connect it to the PCB, the shield is used to power the sensor with 5 volts and the center conductor is the return path of sensor. The signal first goes in junction-gate field-effect transistor (JFET) preamp and buffer stage, after which main amplifier stage is presented with AC coupling, to remove any DC offset. Amplifiers are ADA4625 [51], which are low noise, precision fast setting time, rail to rail opamps, specially designed for photo diode sensor interfaces and amplifiers. The gain of the amplifier is adjustable and is about 500-650 depending on gain potentiometer. After amplification, signal goes in filter stage, low pass filter is used to remove any high frequency noise which is caused by dark current of the sensor as well as from external noise sources, then signal is converted to digital 3.3V level and final stage of filtering is applied to remove any remaining noise before it goes in FPGA. In order to further reduce any Electromagnetic interference (EMI) noise, shields on sensitive amplifier parts can be soldered (golden rectangle shape traces on Figure 32)

Figure 34 shows power supply configuration. There are 4 independent power supply, U1 - LTC3260EMSE [52] is a low noise, low dropout, dual supply inverting charge pump, it has switching frequency in range of hundreds of kHz, it also has low noise Low-dropout regulator (LDO) post regulator, which will further decrease noise of the supply. The RMS noise (according to data sheet) is 0.1 mV. This regulator is used to supply opamps. U5 is used

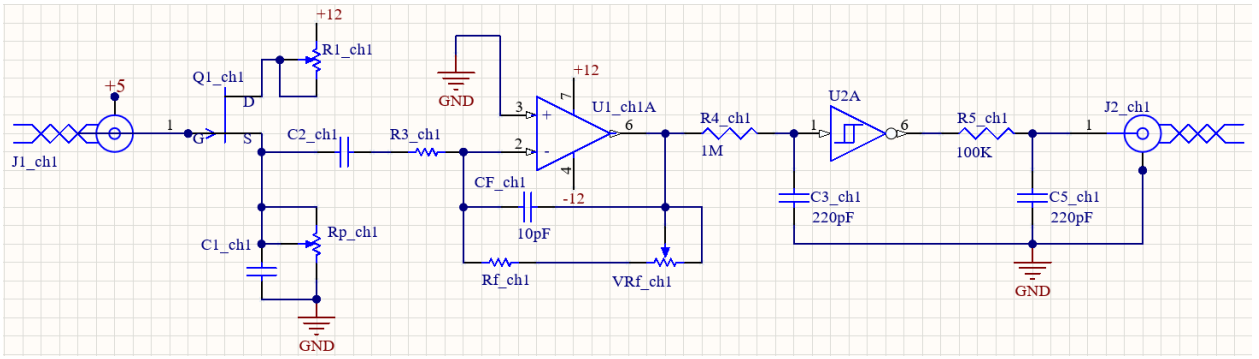


Figure 33: one channel of the amplifier

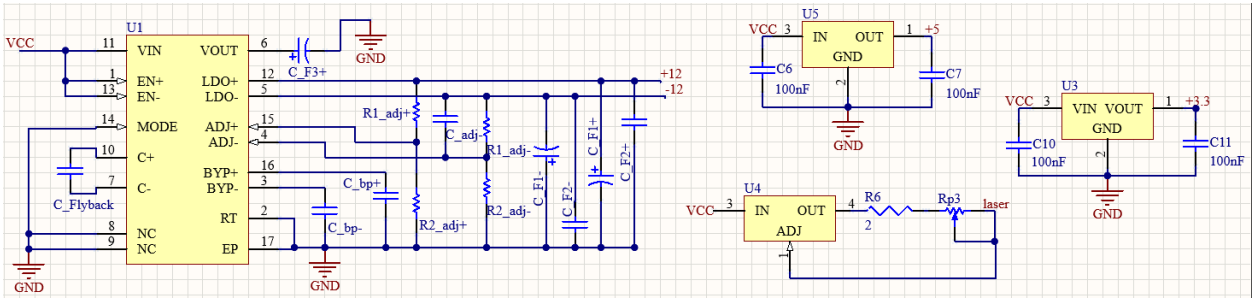


Figure 34: Power supply for TOF system

to supply photo diodes, as any noise in sensor power will be amplified hundreds of times, the decision has been made to use separate linear regulator for it, this will isolate sensor power from any other power rails in the system. U3 is used to supply schmitt triggers, which determine digital signal level. U4 is designed to be a constant current source which is used to power the laser diodes, output current is adjustable and lasers can be individually powered on or off via isolated control signals from [FPGA](#). The system has been tested and amplifiers calibrated, most tests were done with $400\ \mu\text{m}$ metal ball or $100\ \mu\text{m}$ wire, one example of the tests can be seen on [Figure 35](#)

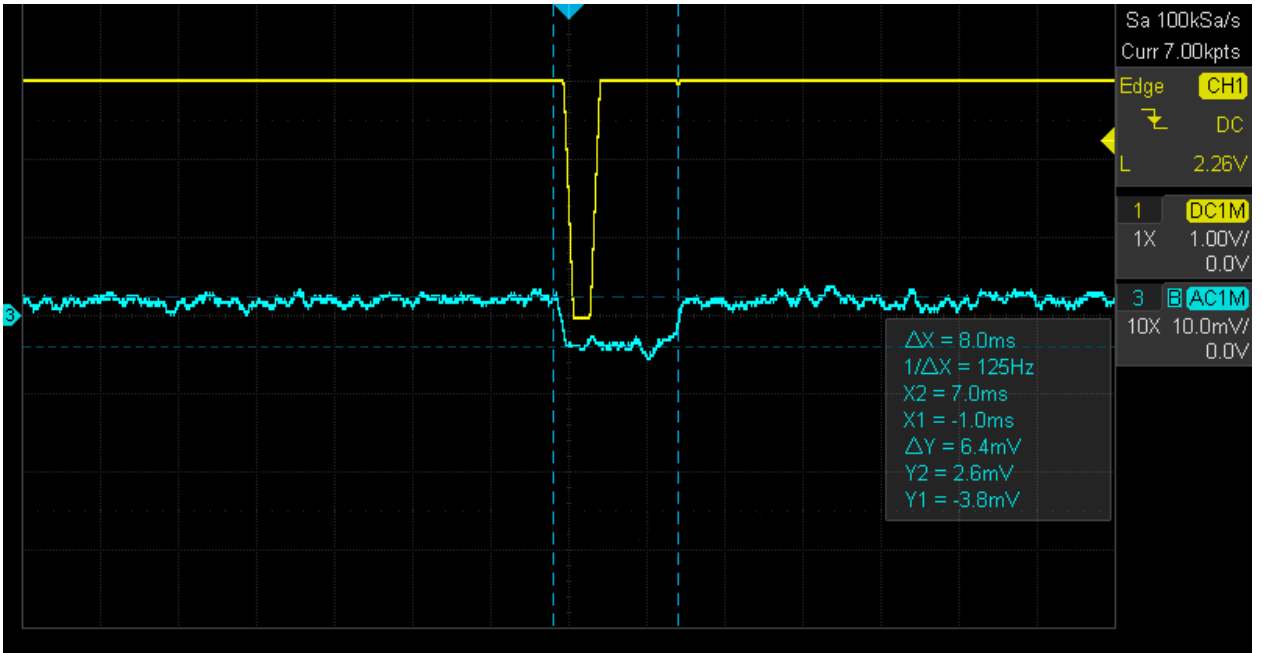


Figure 35: The first test of TOF board, blue is the input signal, which is 100 μm thick wire dropping in the laser beam and detected with photosensor. Yellow is the output signal

4.3 Camera overview

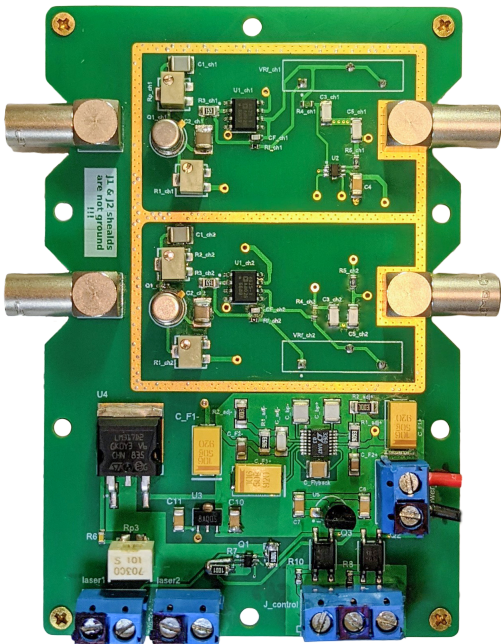


Figure 32: TOF and Triggering PCB

Together with precise timing information, we need precise trajectory reconstruction too. Laser optical system cant give us proper, precise tracking data of the pellet, for this task, high speed camera will be used in the project. There are several types of cameras and care must be taken to chose proper one for this task. Types of camera sensors are divided into Complementary Metal Oxide Semiconductor (**CMOS**) and Charge-Coupled Device (**CCD**) sensors, both of them have their pros and cons. The main difference between **CMOS** and **CCD** sensors are how information is read out from the pixel array. **CCD** are current driven devices, charges are accumulated in each pixel, then each of them are shifted thru vertical shift registers, the output is an analog pulses, then in case of digital cameras, its converted to digital information using **ADC** (Figure 36 left). The charge is proportional to the light intensity. Microlenses are placed over each pixel to increase the photon collection area and focus photons to the photosensitive area. The main drawback of **CCD** cameras are limitation of packet transfer speed, this reduces maximum speed that the sensor can achieve but at same time it leads to the

high sensitivity and pixel-to-pixel consistency, since each charge packet sees the same voltage conversion.

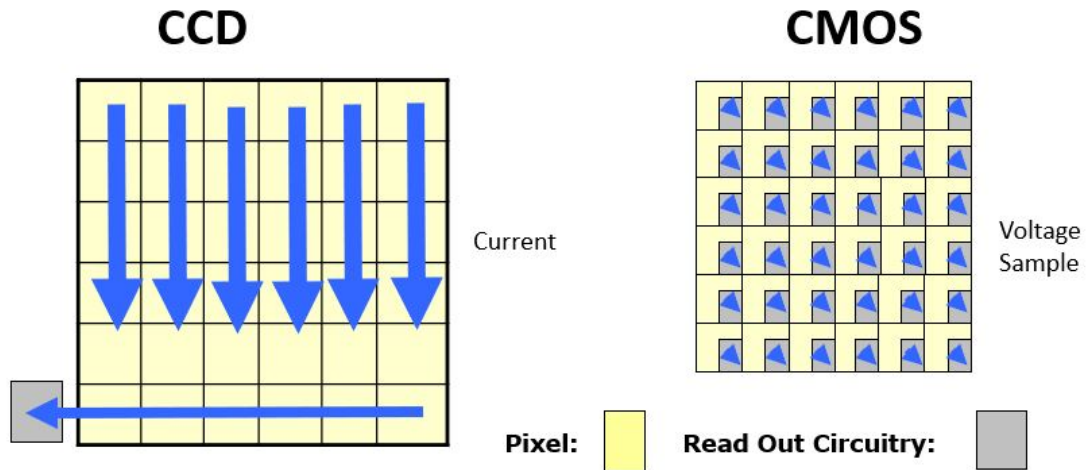


Figure 36: The difference between CCD and CMOS camera readout

In a **CMOS** sensor, the charge from the pixels are converted to a voltage at the pixel site, then the signal is multiplexed by row and column to multiple on chip Digital to Analog Converter (**DAC**)s (Figure 36 right). Each photosensitive area consists of a photodiode and three transistors, performing the functions of resetting or activating the pixel, amplification and charge conversion. This method leads to the high speed of **CMOS** sensors, but also low sensitivity as well as high fixed-pattern noise, because of the inconsistency in fabrication of the multiple charge to voltage conversion circuits. [65] [66]

In general the rolling shutter configuration of the multiplexers, when different lines of the array are exposed at different times as they are read out, are used in **CMOS** cameras, but with additional transistors in pixel electronics, global shutter versions can be achieved, where all pixels are exposed simultaneously and read out sequentially, this mode is better for capturing moving objects.

In the current application the most important parameter is the speed of camera, as we want to capture as much information as we can during pellet target fly. The motion blur is also important for us, **CCD** provides better performance in this parameter, but considering the speed drawback, using **CMOS** camera with the global shutter will be the better choice. However in this project, for the tests, the rolling shutter **CMOS** camera will be used because of availability. The data transfer and control of the global shutter cameras are not much different so rolling shutter camera will be easily interchangeable with global shutter camera later for improvements.

4.4 FPGA system development

As already described the pellet target system has several crucial components in it, which needs to be monitored or controlled in real time. Despite of real time control there is several systems which needs fast, complicated processing and lots of computational power. For example, we need real time system for TOF measurements, and big computational power for the image processing, we also need some kind of communication mechanism for controlling the target and getting back the information. There are several systems which can be considered as the system of choice for this project, one would be to use some kind of single board computer such as Raspberry Pi, it has the ability to run linux operating system and it will be very easy to use this future for controlling the system, it also can access cameras, but the biggest drawback of Raspberry Pi is that its not real time and it doesn't have operational power to process images fast enough, because it uses its CPU and in built Graphical Processing Unit (GPU) core for processing. Other approach is to use FPGAs, they are very powerfully and fast, with proper board we can achieve fast parallel image processing and real time TOF measurement, but making good communication system with only FPGA is not sufficient because its not very easy to make network interface, needs lots of time and resources of FPGA (internal Look Up Table (LUT), Block RAM (BRAM), flip flops ...) to develop Transmission Control Protocol (TCP) or Web server or any convenient communication method, in this case we will need big FPGA to fit everything inside. One other way is to use FPGA-CPU mix, so fast, complicated and real time tasks will be done on FPGA and all other configuration, communication, data interpretation tasks will be done on CPU side. One could use physically separated FPGA and CPU but there is also ready made System On Chip (SOC) from Xilinx called ZYNQ, this is the FPGA with built in physical CPU, using it will help us reduce material count, space on board and avoid us using different Integrated Development Environment (IDE)s as ZYNQ can be fully programmed with Xilinx Vitis Platform (previously called Xilinx Vivado, in this project both will be used).

FPGA is an integrated circuit, that consists of internal hardware blocks such as flip-flops and lookup tables (Figure 37), which can be programmed to perform specific tasks. Unlike CPU, FPGAs are very good in parallel tasks. Each process can be independent. They run on a dedicated section of the chip and can function autonomously without any influence from other logic blocks. FPGAs are often used in image processing applications for their fast parallel processing capabilities The performance of one part of the application is not

affected when more processing tasks are added to the system.

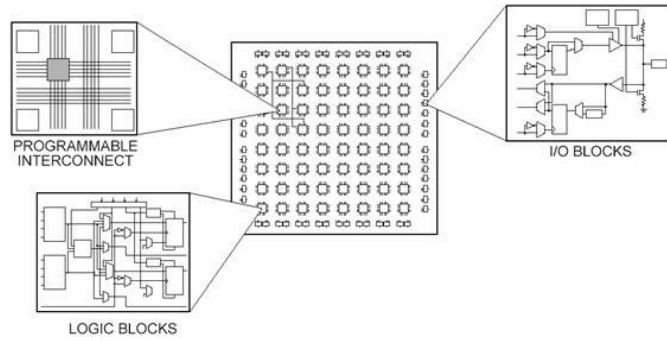


Figure 37: The Different Parts of an FPGA

There are several ways to program **FPGA** devices, using Hardware Description Language (**HDL**) languages such as Verilog and **VHDL** Hardware Description Language (**VHDL**), using graphical High level synthesis (**HLS**) software such as Vivado **HLS** tool. More in depth details can be seen in following article [62]. In this project **VHDL** and C++ with Vivado **HLS** will be used.

In this project Zynq 7000 **SoC** based "Zybo Z7-20" board is used [36], which has all necessary input and outputs as well as processing power for our system. The board consists of ZynQ-7000 family **FPGA** which are equipped with 667 MHz dual-core Cortex-A9 processor, Double Data Rate three Low voltage (**DDR3L**) memory controller with 8 Direct Memory access (**DMA**) channels and 4 High Performance Advanced eXtensible Interface (**AXI**) Slave ports, which is good for fast data exchange, 1G Ethernet will be used for information exchange with other systems, Mobile Industry Processor Interface (**MIPI**) Camera Serial Interface (**CSI**)-2 is used for camera connection. 28 nm Artix-7 based programmable logic, with up to 6.6M logic cells offers transceiver speed ranging from 6.25 Gb/s to 12.5 Gb/s, which is more than enough for this application.

4.5 TOF in FPGA

As already explained earlier **TOF** has its own **PCB**, after detection of the target, two - start and stop signals are sent to the **FPGA**. The task for the **FPGA** is to calculate the time of flight. This is done by sampling the interval between these two signals with 400 Mhz frequency that will give us a time resolution of 2.5 nS. The **IP** has 3 inputs 2 for input from **PCB** as trigger signals and one for enable. trigger inputs are already 3.3 V active low signals from **TOF PCB**, in the **FPGA** falling edges are detected and counter is triggered. After stop trigger the **TOF** data is written into **AXI** register and interrupt is generated for **CPU**, there are two **AXI** registers, one is **TOF** information and the other is counter value for debug. The

start and stop interrupts are also generated as soon as target crosses each laser and they also go in CPU for further data analysis, they determine which frames must be processed to get the correct tracking information of the pellet. The simplified FPGA design can be seen on Figure 38, where on the left hand side there are input signals, going in to TOF IP, the clock generator generates sampling clock. interrupts from IP are sent to CPU, also there is a debug data port from IP. After FPGA IP has been created and test system in FPGA has been developed, two channel signal generator has been connected to the device to simulate start and stop signal, the device used Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (UART) port for communication to computer and data exchange and results can be seen on Figure 39.

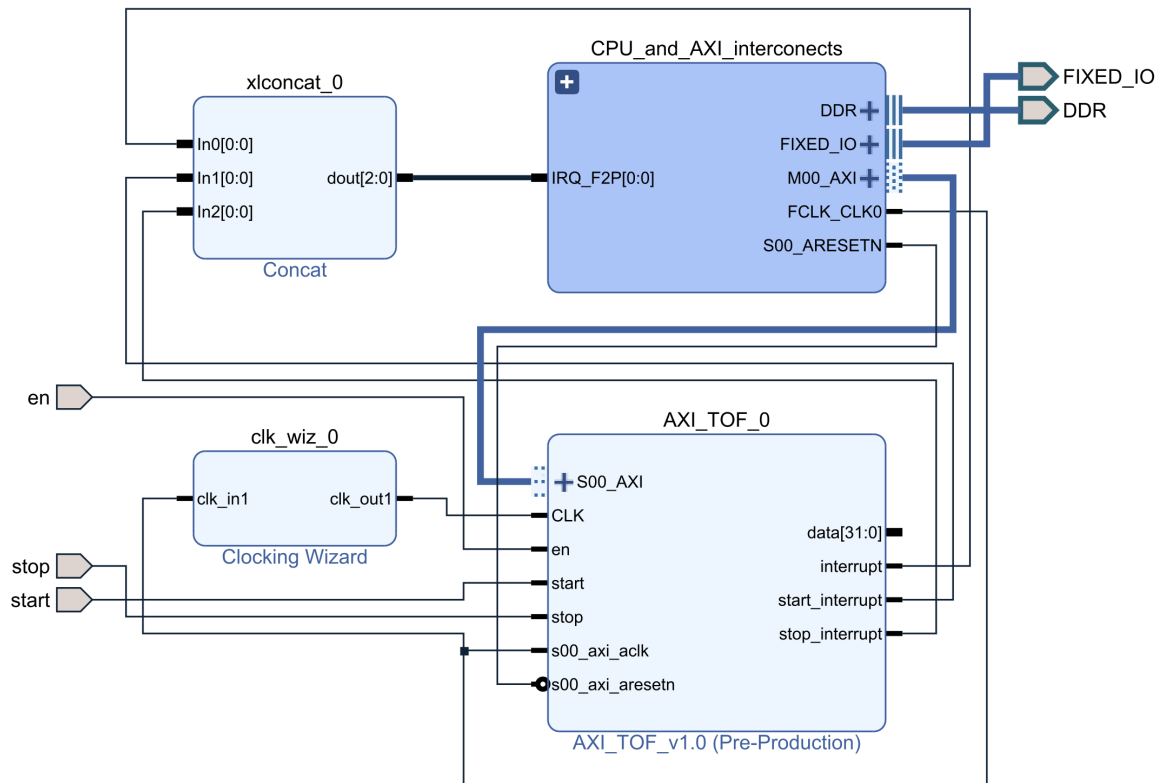


Figure 38: Simplified TOF design

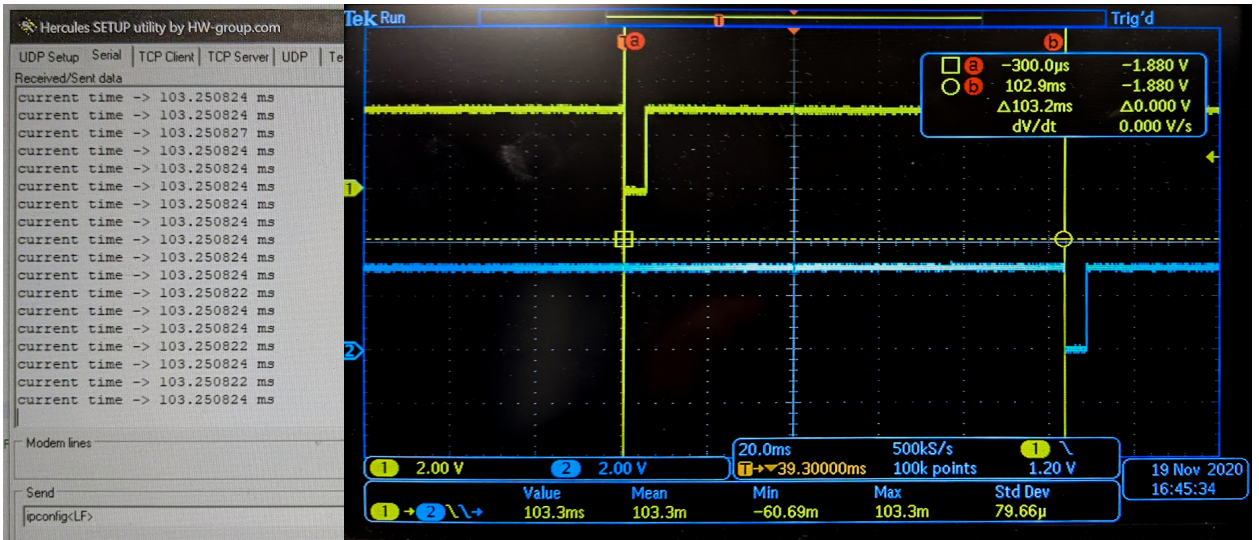


Figure 39: The results of the delayed signal test, data is sent to the laptop using UART interface (Left) generated delayed signals using signal generator(Right)

4.6 Image Processing

To get the pellet tracking data, we need proper image processing algorithm. There are lots of image processing techniques already developed. The requirements for image processing in this project is to be easy to implement, it must have high throughput, efficient tracking response. Most of the easy image processing algorithms cant provide good edge detection. During the project I have tried several 2D filters, but edge detection was not good Figure 40, all tests has been done with custom [IPs](#) and [FPGA](#) hardware. Finally Canny edge detection [55] has been chosen, which provides good edge detection also its not too hard to implement in [FPGA](#) using [HLS](#) technique.

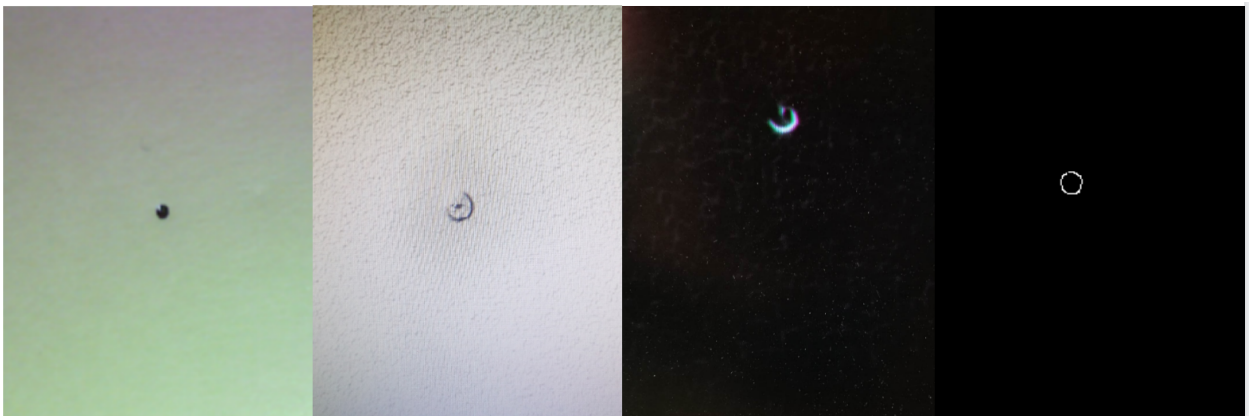


Figure 40: 1.Image captured from FPGA board (no image processing); 2. same image processed using color invert and Sobel filter; 3. Test using Pewitt filter; 4. Test using canny edge detect.

4.6.1 Canny Edge Detect

Canny edge detection is a technique to extract useful structural information from different vision objects and dramatically reduce the amount of data to be processed. The general criteria for edge detection include:

1. Detection of edge with low error rate, which means that the detection should accurately catch as many edges shown in the image as possible
2. The edge point detected from the operator should accurately localize on the center of the edge.
3. A given edge in the image should only be marked once, and where possible, image noise should not create false edges.

The process of Canny edge detection algorithm can be broken down to five different steps:

- Apply Gaussian filter to smooth the image in order to remove the noise
- Find the intensity gradients of the image
- Apply gradient magnitude thresholding or lower bound cut-off suppression to get rid of spurious response to edge detection
- Apply double threshold to determine potential edges
- Track edge by hysteresis: Finalize the detection of edges by suppressing all the other edges that are weak and not connected to strong edges.

The noise plays big role in edge detection results, sometimes noise will be interpreted as false edges, so it is necessary to remove any noise before applying edge detection and tracking algorithms. For this reason widely known Gaussian blur algorithm is used. In this project 5x5 kernel size is used.

$$\frac{1}{256} \begin{bmatrix} 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \\ 4 & 16 & 24 & 16 & 4 \\ 6 & 24 & 36 & 24 & 6 \\ 4 & 16 & 24 & 16 & 4 \\ 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \end{bmatrix}$$

Figure 41: 5×5 kernel for Gaussian blur

An edge in an image may have different directions, Canny algorithm uses four filters to detect horizontal, vertical and diagonal edges in the image. The Sobel edge detection operator is used in this case, this operator uses two 3×3 kernels

$$G_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} * A \quad G_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} * A$$

Figure 42: 3×3 kernel for Sobel filter

If we define A as the source image, and G_x and G_y are two images which at each point contain the horizontal and vertical derivative approximations respectively. $*$ denotes the 2-dimensional signal processing convolution operation which are convolved with the original image to calculate approximations of the derivatives, one for horizontal changes, and one for vertical. From its output the resulting gradient approximations can be combined to give the gradient magnitude, using: $G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}$ Using this information, we can also calculate the gradient's direction: $\Theta = \text{atan2}(G_y, G_x)$. The edge direction angle is rounded to one of four angles representing vertical, horizontal, and the two diagonals (0° , 45° , 90° , and 135°). Next stage is to apply non maximum suppression, its an edge thinning technique,

the algorithm categorizes the continuous gradient directions into a small set of discrete directions, and then moves a 3×3 filter over the output of the previous step (that is, the edge strength and gradient directions). At every pixel, it suppresses the edge strength of the center pixel (by setting its value to 0) if its magnitude is not greater than the magnitude of the two neighbors in the gradient direction.

After application of non-maximum suppression, remaining edge pixels provide a more accurate representation of real edges in an image. However, there are some pixels that are caused by noise and color variation. By setting high and low thresholds we can remove pixels with a weak gradient value and preserve edge pixels with a high gradient value, these values are set empirically. Whole process can be seen on figure 43

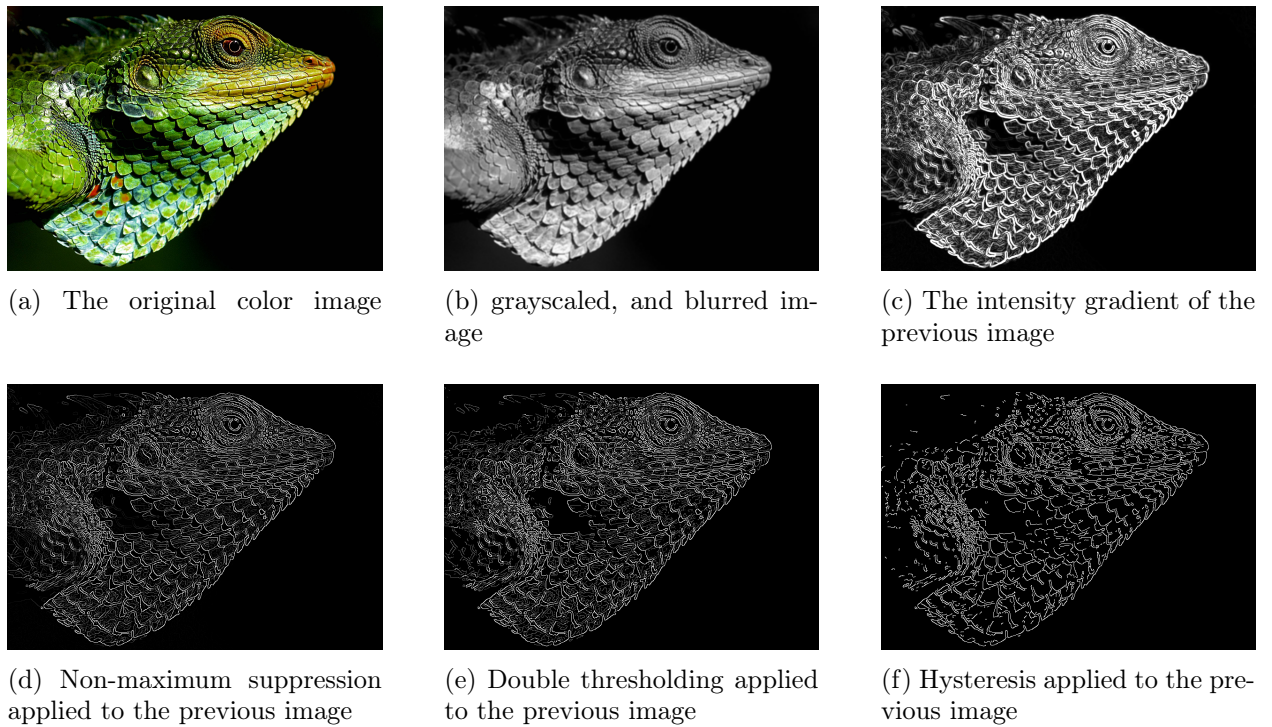


Figure 43: Canny edge detection steps

To use Canny edge detect, dedicated IP has been created using Vivado HLS. The IP has one input and one output AXI stream port and one AXI lite port for communication. It can accept video stream with maximum data width of 24 bits, 8 bit per color component. It takes the color image stream and does the image processing as described in the algorithm. Each step has its fifo buffer to handle the image data. for optimisations, pipelining technique is used in Vivado HLS. The IP has several registers for adjustments from CPU side, two registers for high and low threshold values and one for zero padding adjustment, it has also image width and height registers but they are not fully implemented in current version and maximum image is set to 1280x720, but lower resolutions are available with black fill on inactive areas. If the image size needs to be changed, IP must be recompiled. The output of this IP is then passed to next stage for object tracking.

4.6.2 Center of Gravity

The next step in image processing is to determine where the target is, get its coordinates and track it. There are lots of ways to do this task. In general first step to determine how many objects are in image to track. In our case this step is not needed as only object to track is the target, there are no other objects in the frame. There can be a situation when in real conditions where the camera will be mounted it can see some edges from metal constructions, this can be eliminated by setting proper Region of Interest (ROG) which will discard other edges. In case where there will be some other edges behind the target and ROG cant block

them we can use optical solution, having camera with very narrow depth of field, which will be focused on target. with such lens only target will be in focus and background will be blurred and this will be dialed with edge detector which is sensitive to edge changes and blurred parts will be discarded. If there still is some other edges Connected Component Labeling algorithm can be used to determine how many objects we have, label them and track separately.

To track the target lots of methods can be used, we will focus on simple methods here. One is to save previous frame and then compare current frame to previous, this approach needs lots of resources in [FPGA](#). Other method is to process every frame, find the target and save only coordinates so we only save several values not whole frame. In this project so called Center of Gravity ([COG](#)) method [68] is used to determine coordinates of the target. As the image after edge detection is binary (edges are white, other parts black), and we have only one object in a region of interest, we can just simply average all x and y coordinates, this will give us the center pixel of the object. this calculation is done for every frame, coordinates are written in register and interrupt is generated for [CPU](#). [ROG](#) can be adjusted from [CPU](#) at run-time, smaller the [ROG](#), less calculations will [FPGA](#) do.

4.7 [FPGA](#) design

To develop, test and debug video processing [IPs](#), one of the best way is to generate a defined video signal using computer, transfer it to the processing hardware and then see the results of the image processing. this approach gives us the ability to debug any errors in fast way. During image processing [IP](#) development [HDMI](#) to [HDMI](#) test system has been developed. The video signal has been transmitted to [FPGA](#) board using [HDMI](#) interface, using [UART](#) interface the parameters of the image processing [IPs](#) could be changed and the result from the [FPGA](#) hardware were routed to [HDMI](#) display. The display output still remains in camera enabled solution too for debug and visualisation purposes. One more test setup was to have both [HDMI](#) and camera streams in the system and using [UART](#) change the video processing pipeline input to either camera or [HDMI](#). In all those test systems we had stream switch capabilities also to switch between different modes of image processing algorithms. After [IP](#) development the system was modified to have camera input only and one image processing pipeline.

The [FPGA](#) design is based on Digilent Pcam-5C example [56]. Camera stream is fed to the Digilents free [MIPI CSI-2](#) and D-PHY Vivado [IP](#) cores [57], then it goes thru several

image processing blocks and output is transmitted to display using [HDMI](#) interface. Video pipeline (without image processing) of design can be seen on [Figure 44](#). Pcam 5C [\[60\]](#) uses OV5640 5MP color image sensor [\[59\]](#). This sensor includes various internal processing functions including automatic white balance, automatic black level calibration, and controls for adjusting saturation, hue, gamma and sharpness. Data is transferred over a dual-lane [MIPI CSI-2](#) interface. The Flat Flexible Cable ([FFC](#)) connector is compatible to Raspberry Pi, which in theory gives us the ability to use Raspberry Pi cameras too. The problem with Digilent's free [MIPI IPs](#) are that they are developed and tested for Pcam 5C and there is no information about using different cameras with these [IPs](#). During development we tried to use ov9281 monochrome global shutter camera [\[58\]](#) but the frames were damaged and we were unable to reconstruct the correct frame.

The data in cameras with In [MIPI](#) interface are transmitted using differential pairs, in our case its 2 differential pairs. The physical layer of the [MIPI CSI-2](#) interface is called D-PHY. It is supported by the I/O blocks on Xilinx Ultrascale devices natively, but requires some passive circuitry external to the [FPGA](#) in order to be connected to Xilinx 7-series devices. It pears to [MIPI CSI-2 Receiver IP](#) with PHY-Protocol Interface ([PPI](#)) to receive data from image sensor. The output of [MIPI CSI-2 Receiver IP](#) is [AXI-stream](#), which contains RAW pixels, for farther processing [AXI_BayerToRGB](#) converter is used to convert RAW Bayer pattern to RGB pixels, after which the gamma correction is applied and image is written to the Random-access memory ([RAM](#)) using [AXI Video Direct Memory Access \(VDMA\)](#). The gamma correction has several adjustment registers and are controlled by the [CPU](#), gamma values can be adjusted during operation. [VDMA](#) is also controlled by the [CPU](#), frame buffer sizes are set, ring buffer configured, frame write and frame read interrupts are enabled. The video stream is sent to the [HDMI](#) subsystem from [VDMA](#) for visualisation and testing of the algorithms.

The Xilinx also provides [MIPI interface IP](#), it was not free at the beginning of the project but after some times they made it free and we decided to use Xilinx [MIPI CSI-2 RX Subsystem](#) [\[64\]](#). Using this [IP](#) gives us more flexibility and control over wide range of cameras, It also includes Linux drivers which can be very useful for system upgrade from standalone firmware to embedded Linux. The subsystem captures images from [MIPI CSI-2](#) camera sensors and outputs [AXI-Stream](#) video data ready for image processing. The subsystem allows fast selection of the top level parameters and automates most of the lower level parameterization. During [IP](#) development we used Pcam 5c for tests and software development, but with Xilinx [MIPI IP](#) we tried one more image sensor IMX219 [\[61\]](#). It is

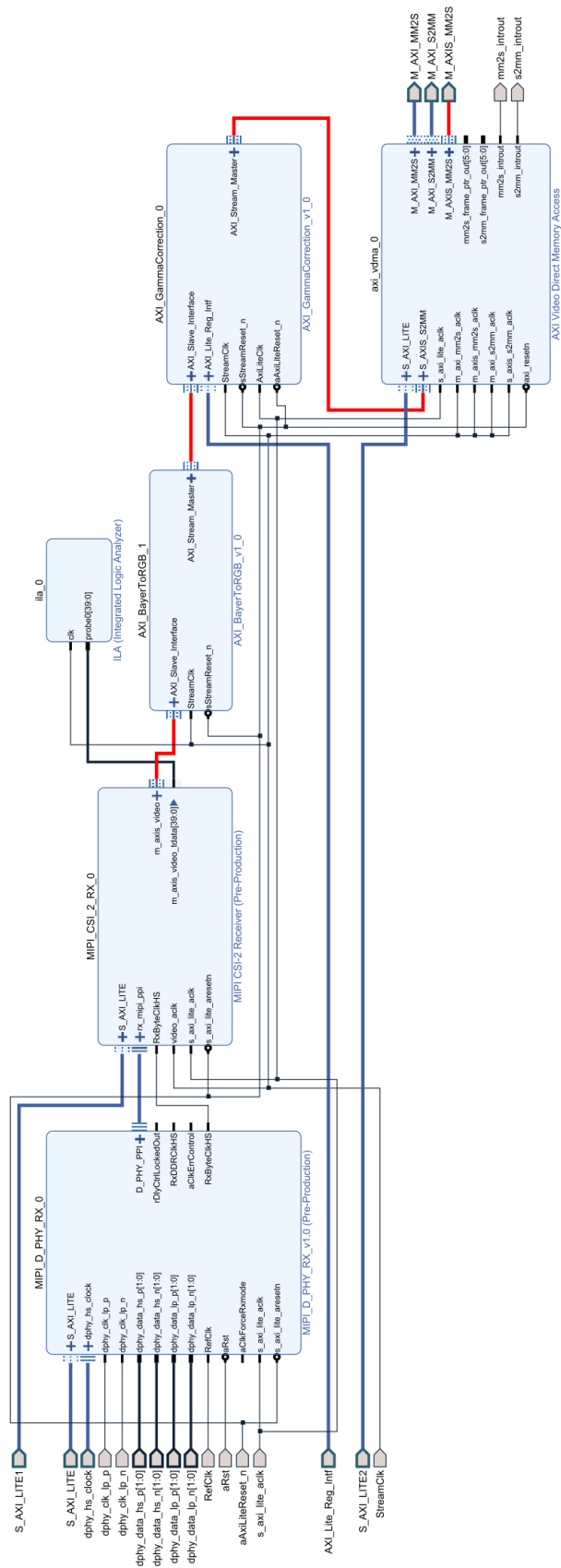


Figure 44: Simplified overall system design

one of the Raspberry Pi camera module. Although the official sources does not state that this camera can reach high frame rate, some unofficial sources [63] provide information that we can get high FPS, also the image quality seemed to be better based on some experiments compared to Pcam 5c, so we decided to concentrate on IMX219 and develop some drivers for it too.

The system has several clock sources needed for different subsystems. 400 Mhz for TOF, it can be changed to get different resolutions of TOF measurements, MIPI interface reference 200 Mhz, AXI interface is working on 100 Mhz clock and as for pixel clock, this must be determined by calculating some variables which affects systems performance.

$$PixelClockFrequency = TotalHorizontalSamples \times TotalVerticalLines \times RefreshRate.$$

$$TotalDataRate(Bandwidth) = PixelClockFrequency \times PixelSize(inbits).$$

$$DataRateperLane = TotalDataRate(Bandwidth)/NumberOfDataLane.$$

Based on this formulas we can calculate the minimum pixel clock image processing needs to process the data. In high Frames per Second (FPS) settings (using Raspberry Pi camera IMX219) we have 640x128 resolution (resolution is reduced for high FPS), with this resolution theoretical maximum frame rate for FPGA (Zynq 7000 devices support 1200 Mbps line rate) will be roughly 2900 FPS, but the camera cant achieve this. From non official sources the camera can achieve 640x128 at maximum 682 FPS with 4 line MIPI interface, as our board only supports 2 line MIPI interface the frame rate will be half, about 341 FPS. With this settings the minimum PCLK needs to be 28 Mhz and the bandwidth will be 280 Mbps, which results in 140 Mbps of line rate. Every frame goes in to image processing pipeline and is written to RAM in one of the 32 frame buffers reserved with VDMA, which means that we can always have 32 frames in memory for further processing. Currently the system is using standalone firmware to boot and configure the FPGA, it also controls parameters of several IP blocks on run-time and returns image processing data using UART interface. The firmware consists of several drivers for different parts such as camera, Inter-Integrated Circuit (I2C) interface, VDMA, TOF, interrupt controller, HDMI interface and associated timers. The firmware supports two cameras, Pcam 5c with OV5640 and Raspberry pi camera with IMX219 with several resolutions, see table 4.1. Using UART interface we can control several parameters of the system. The maximum frame rate using IMX219 image sensor we achieved was roughly 500 frames with resolution of 640x64, but it was not very stable and further investigation and development is needed. When system is loaded instances of driver classes are created and initialised with default parameters, cameras cant be auto detected in

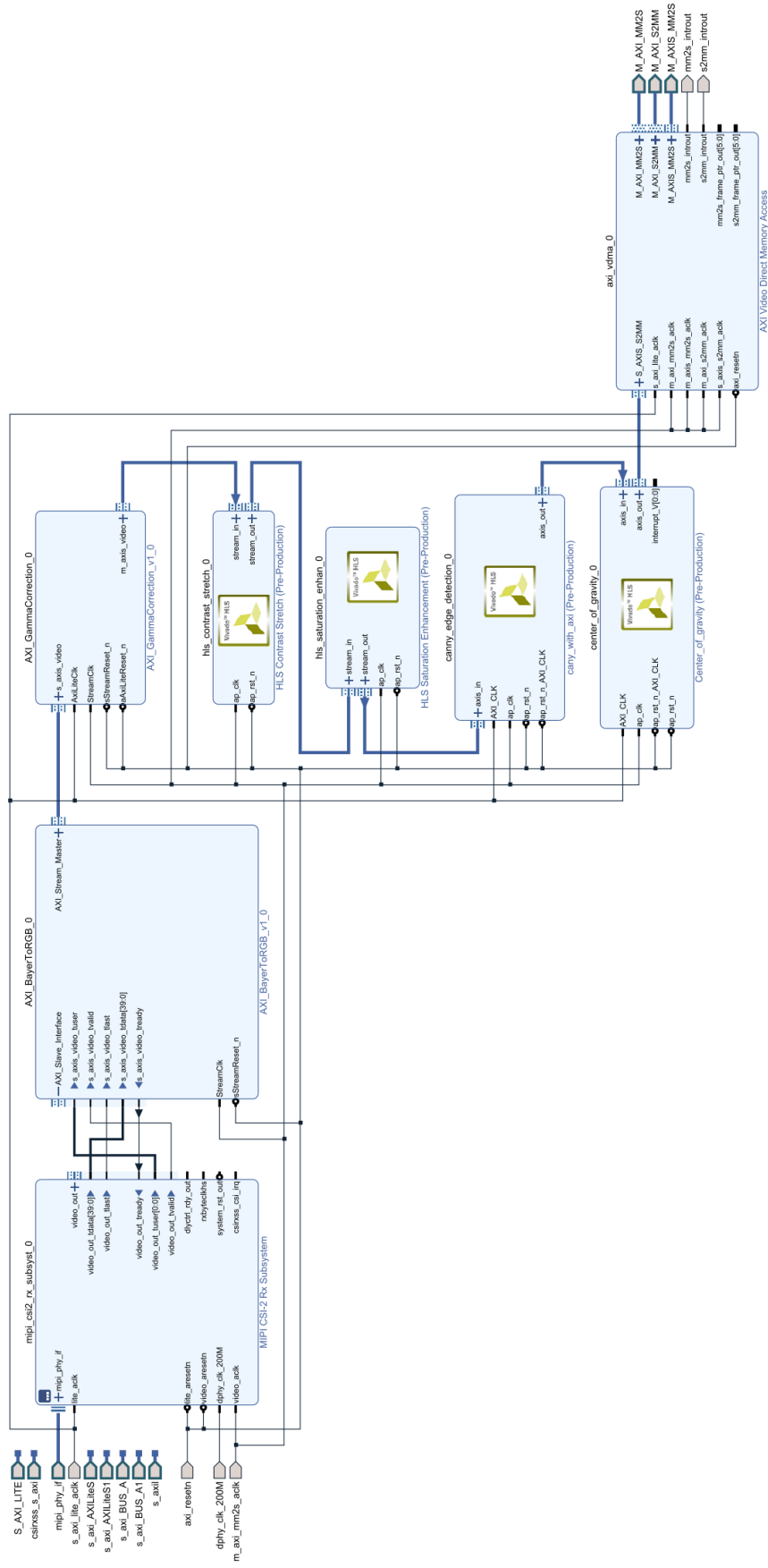


Figure 45: Video processing pipeline

this version and must be hard coded. [VDMA](#) core is also initialised with 32 frame buffers, each bufer size is adjusted according to the resolution used. Frame write and frame read interrupts are activated, on each frame write interrupt [VDMA](#) driver records the frame pointer and value of [COG IP](#) which is the position of the target on that frame. The [TOF](#) system is initialised and start and stop interrupts activated, on each start and stop interrupt [TOF](#) records the [TOF](#) values and calculates the speed, also on each interrupts it gets the pellet position data from the [VDMA](#) driver and sends the pellet tracking and speed information on [UART](#) port. With this approach we always have pear of image address and appropriate target position in memory for maximum of 32 frames, which is sufficient for first tests, but it can be increased in future.

Parameter	Value(s)
Resolution	OV5640 (1 = 1280x720, 2 = 640x480, 3 = 320x240), IMX219 (1 = 1280x720, 2 = 640x128, 3 = 640x64)
Write to image sensor register	address and value of sensor register in hex
Read from image sensor	address of image sensor register in hex
Gamma correction values	1, 1/1.2, 1/1.5, 1/1.8, 1/2.2
Saturation	0 = 0, 1 = -0, 2 = 0.2, 3 = 0.4, 4 = 0.6, 5 = 0.8, 6 = 1.0, 7 = 1.2
Contrast	0 - 255 in hex
Operating mode	Bypass or Image processing mode
Canny edge detection thresholds	High, Low thresholds and zero padding in hex
Camera analog gain	Gain of the sensor to compensate low light in high FPS
Camera integration time	Different for every resolution, but can be overridden to change the FPS (not all values will work)

Table 4.1: Table lists the parameters which can be changed from UART terminal and will be applied on run-time

Because of the lack of mechanical system, most of the image processing tests were done with simulated video stream. In [46](#) one of the test is shown. The scene in video is simulated, It is roughly what camera will see in target chamber. The video is generated using Autodesk Fusion360 [?] and is fed to the [FPGA](#) board, after decoding the [HDMI](#) stream, RGB data goes to Canny Edge detect [IP](#) several settings are adjusted from [CPU](#) to have the best edge detection, after edge detection the binary image stream is fed to [COG](#) algorithm, where region of interest is applied based on the settings from [CPU](#) to discard the areas which has no usable information for us. [COG](#) calculates the coordinates of the pellet on each frames and the [CPU](#) combines the information from [VDMA](#) and [COG](#) and provides us the tracking data on computer using [UART](#) interface.



Figure 46: small video demonstration of image processing and object tracking with simulated pellet dropping in target chamber

Chapter 5

Conclusions

Finally I would like to summarize all the results achieved during my Ph.D studentship.

- The first and most important result is **the ballistic target concept** development. This type of target is completely new and needs further study. This applies mainly to its mechanical construction, which was out of objectives of this work. On the other hand, developed hardware and software components of the target is a good starting point for next generation pellet targets, or other systems which require fast image processing, using mipi camera stream or HDMI;
- Chosen and elaborated hardware system makes possible to develop different types of image processing algorithms and implement them easily. Custom developed drivers manage processing hardware and exchange of the information with user developed software;
- Developed TOF system, consisting of dedicated PCB, FPGA IP and the hardware driver is a solution to measure time and speed of the pellet target precisely with uncertainty of 2.5 ns . Combining the image processing and TOF systems makes possible to reconstruct the track of the pellet precisely and using the detector system allows to define the polarization distribution in the beam transverse profile.
- Several engineering solutions have been developed, including solid block target control system (control software and part of hardware);
- The whole TOF system has been developed. Several test procedures were performed in order to choose a proper light sensor and appropriate amplifier topology. The new developments are high gain, precise, low noise dual amplifier and signal shaper board,

dedicated IP to use it in **FPGA** and hardware driver to control the stream and get the data. The hardware tests were done using 3D printed dedicated mechanical system. This made possible to calibrate the amplifiers for 400 *nm* pellet;

- The hardware test system was developed to make sure that the camera and HDMI streams work properly. After successful tests, several image processing methods were applied to the data stream to extract the edge information. Finally, the **Canny Edge Detection** has been chosen because of its simplicity and good performance. Dedicated IP has been made using **Vivado HLS**;
- Another image processing algorithm was developed to calculate the center of gravity of the image and to define the coordinates of the pellet target center. In order to test these algorithms, test video stream has been generated using 3D software, where we simulated the target chamber and the pellet target dropping at free fall speed. The stream was fed into the FPGA and the tracking data was sent to the computer using UART communication. The test showed that the system is capable to properly detect the target and trace its movement crossing the beam and define the coordinates. All these systems were controlled using CPU in **Zynq SoC** hardware drivers. Several parameters for the image processing can be adjusted on the video stream, including the parameters of **Canny Edge Detection** algorithms (resolution, thresholds and zero padding values). **ROG** window of the pellet tracking can be changed according to the precision of the mechanics and environmental factors;
- Frame rate and resolution of the camera can be changed to get the maximum performance. The system works in ring buffer mode where we have 32 frame buffers and at any point previous frames are accessible if there will be some delay between TOF trigger and the camera stream data (we can start track reconstruction from previous frames).

Despite of the major work that has been done during the project, there is still some work that needs to be done to be able to use this system in real life conditions. First of all, some mechanical test system has to be developed, which will give us the ability to do a complex tests on the system. Up to this point the system doesn't have proper system integration mechanism. It works as a standalone device. But after the mechanical parts of the system will be improved, interface with different parts of the detector and data exchange will be possible.

Bibliography

- [1] L. Canetti, M. Drewes, and M. Shaposhnikov, *Matter and Antimatter in the Universe*. New Journal of Physics, Focus Issue on the Origin of Matter, Vol. 14, 095012, (2012).
- [2] W. Bernreuther, *CP violation and baryogenesis*, Lect. Notes Phys. 591(2001) 237-293 Y. Semertzidis, *Axion dark matter searches*, PoS ICHEP 2018 (2019) 729. doi:10.22323/1.340.0729
- [3] A. D. Sakharov. *Violation of CP Invariance, C Asymmetry and Baryon Asymmetry in the Universe*. Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz., Vol. 5, Nr. 1, (1967).
- [4] T. Chupp, P. Fierlinger, M. Ramsey-Musolf and J. Singh, *Electric dipole moments of atoms, molecules, nuclei, and particles*, Rev. Mod. Phys. 91, 01500 (2019).
- [5] F. J. M. Farley, K. Jungman, J. P. Miller, Y. F. Orlov, B. L. Roberts, Y. K. Semertzidis, A. Silenko, and E. J. Stephenson, *New Method of Measuring Electric Dipole Moments in Storage Rings*, Phys. Rev. Lett. 93, 052001 (2004).
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.052001>
- [6] V. Anastassopoulos et al., *A storage ring experiment to detect a proton electric dipole moment*, Rev. Sci. Instrum. 92, 092003 (2015).
<https://doi.org/10.1063/1.4967465>
- [7] F. Abusaif et al., *Storage Ring Search for Electric Dipole Moments of Charged Particles - Feasibility Study*, CERN Yellow Report 257 (2021).
<https://doi.org/10.23731/CYRM-2021-003>
- [8] F. D. Bechetti, Jr. and G. W. Greenlees, *Nucleon-Nucleus Optical-Model Parameters, $A > 40$, $E < 50$ MeV*, Phys. Rev. **182**, 1190 (1969).
<https://doi.org/10.1103/PhysRev.182.1190>

- [9] W. W. Daehnick, J. D. Childs, and Z. Vrcelj, *Global optical model potential for elastic deuteron scattering from 12 to 90 MeV*, Phys. Rev. C **21**, 2253 (1980).
<https://doi.org/10.1103/PhysRevC.21.2253>
- [10] H. O. Meyer, P. Schwandt, W. W. Jacobs, and J. R. Hall, *Proton scattering from ^{12}C between 120 and 200 MeV*, Phys. Rev. C **27**, 459 (1983).
<https://doi.org/10.1103/PhysRevC.27.459>
- [11] H. O. Meyer, P. Schwandt, R. Abegg, C. A. Miller, K. P. Jackson, S. Yen, G. Gaillard, M. Hugi, R. Helmer, D. Frekers, and A. Saxena, *Proton elastic scattering from ^{12}C at 250 MeV and energy dependent potentials between 200 and 300 MeV*, Phys. Rev. C **37**, 544 (1988).
<https://doi.org/10.1103/PhysRevC.37.544>
- [12] T. Kawabata *et al.*, *Isvector and isoscalar spin-flip M1 strengths in ^{11}B* , Phys. Rev. C **70**, 034318 (2004).
<https://doi.org/10.1103/PhysRevC.70.034318>
- [13] Y. Satou *et al.*, *Three-body dN interaction in the analysis of the $^{12}\text{C}(\vec{d}, d')$ reaction at 270 MeV*, Phys. Lett. B **549**, 307 (2002).
[https://doi.org/10.1016/S0370-2693\(02\)02957-X](https://doi.org/10.1016/S0370-2693(02)02957-X)
- [14] M. W. McNaughton *et al.*, *The p - C analyzing power between 100 and 750 MeV*, Nucl. Instrum. Methods Nucl. Phys. A **241**, 435 (1985).
[https://doi.org/10.1016/0168-9002\(85\)90595-9](https://doi.org/10.1016/0168-9002(85)90595-9)
- [15] M. Tanifuji, *Polarization Phenomena in Physics, Applications, and Nuclear Reactions* (World Scientific, Singapore, 2018).
<https://doi.org/10.1142/10731>
- [16] S. P. Chang, S. Haciomeroglu, O. Kim, S. Lee, S. Park, and Y. K. Semertzidis, *Axionlike dark matter search using the storage ring EDM method*, Phys. Rev. D **99**, 083002 (2019).
<http://doi.org/10.1103/PhysRevD.99.083002>
- [17] J. Pretz, S. P. Chang, V. Hejny, S. Karanth, S. Park, Y. Semertzidis, E. Stephenson, and H. Ströher *Statistical sensitivity estimated for oscillating electric dipole moment measurements in storage rings*, Eur. Phys. J. C **80**, 107 (2020).
<https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-020-7664-9>

- [18] G. Guidoboni *et al.*, *How to reach a thousand-second in-plane polarization lifetime with 0.97-GeV/c deuterons in a storage ring*, Phys. Rev. Lett. **117**, 054801 (2016).
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.054801>
- [19] Z. Bagdasarian *et al.*, *Measuring the polarization of a rapidly precessing deuteron beam*, Phys. Rev. ST Accel. Beams **17**, 052803 (2014).
<https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.17.052803>
- [20] V. Anastassopoulos *et al.*, *A storage ring experiment to detect a proton electric dipole moment*, Rev. Sci. Instrum. **92**, 092003 (2015).
<https://doi.org/10.1063/1.4967465>
- [21] N. P. M. Brantjes *et al.*, *Correcting systematic errors in high-sensitivity deuteron polarization measurements*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **664**, 49 (2012).
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2011.09.055>
- [22] Gerald G. Ohlsen and P. W. Keaton, Jr., *Techniques for Measurement of Spin-1/2 and Spin-1 Polarization Analyzing Tensors*, Nucl. Instrum. Methods **109**, 41 (1973).
[https://doi.org/10.1016/0029-554X\(73\)90450-3](https://doi.org/10.1016/0029-554X(73)90450-3)
- [23] B. Bonin *et al.*, *Measurement of the inclusive p-C analyzing power and cross section in the 1 GeV region and calibration of the new polarimeter POMME*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **288**, 379 (1990).
[https://doi.org/10.1016/0168-9002\(90\)90128-S](https://doi.org/10.1016/0168-9002(90)90128-S)
- [24] B. Bonin *et al.*, *POMME: A medium energy deuteron polarimeter based on semi-inclusive α -carbon scattering*, Nucl. Instrum. Methods **288**, 389 (1990).
[https://doi.org/10.1016/0168-9002\(90\)90129-T](https://doi.org/10.1016/0168-9002(90)90129-T)
- [25] V. P. Ladygin *et al.*, *Analyzing powers for the inclusive reaction of deuterons on carbon at energies between 0.175 and 1.6 GeV*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. **404**, 129 (1998).
[https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(97\)01135-2](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(97)01135-2)
- [26] O. Javakhishvili, I. Keshelashcili, and D. Mchedishvili, *A storage ring polarimeter*, Detection Systems and Techniques in Nuclear and Particle Physics, J. Phys.: Conf. Series **1561**, 012011 (2020).
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1561/1/012011>

- [27] Saint-Gobain, Cerium doped Lutetium PreLude420 crystal. (last visit: 2020.09.30)
http://www.crystals.saint-gobain.com/PreLude_420_Scintillator.aspx
- [28] Epic-Crystal, Ce:LYSO scintillator. (last visit: 2020.09.30)
[http://www.epic-crystal.com/lysoce/lyso\(ce\)-scintillator.html](http://www.epic-crystal.com/lysoce/lyso(ce)-scintillator.html)
- [29] Sichuan Tianle Photonics Co., Ltd., LYSO Scintillator Crystal (last visit: 2020.09.30)
<http://www.tianlephotonics.com/product/1>
- [30] Eljen Technology - Silicon rubber interface EJ-560
<https://eljentechnology.com/products/accessories/ej-560>
- [31] I. Vilandi et al., Nucl. Instr. and Meth. V564, I1, (2006), 506-514
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2006.04.079>
- [32] N. P. M. Brantjes et al.; Nucl. Instr. Methods A 664, 49 (2012)
- [33] I.Keshelashvili, "Jülich Ballistic Diamond Pellet Target for Storage Ring EDM Measurements" Horizon 2020 proposal, ERC Consolidator Grant. Call: ERC-2016-COG.Proposal number: 725006, February 2, 2016)
- [34] I.Keshelashvili et al., - "A new approach: LYSO based polarimetry for the EDM measurements", J. Phys. Conf. Ser. 1162, 012029 (2019)
- [35] MicroFJ-30020-TSV, ARRAYJ-30020-64P-PCB, SensL High Fill-Factor Arrays for Fast Timing Applications.
<http://sensl.com/products/sipmarrays/arrayj/>
- [36] Zybo Z7 Reference Manual
<https://digilent.com/reference/programmable-logic/zybo-z7/reference-manual>
- [37] SIS3316-250-14 16 channel 250 MSPS 14-bit.
<http://www.struck.de/sis3316.html>
- [38] "experimental physics and industrial control system"
<https://epics.anl.gov/about.php>

- [39] Raspberry Pi 3 Model B
<https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-3-model-b/>
- [40] MKS Gen-L Motherboard
<https://www.botnroll.com/img/cms/MKS-Gen-L.pdf>
- [41] Marlin Firmware
<https://marlinfw.org/>
- [42] F. Müller et al., 2017 J. Phys.: Conf. Ser.928 012019
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/928/1/012019>
- [43] JEDI Collaboration Homepage
<http://collaborations.fz-juelich.de/ikp/jedi/>
- [44] A. Sakharov, *Violation of CP invariance, C asymmetry, and baryon asymmetry of the universe*, JETP Letters **5**, 24 (1967).
- [45] Keshelashvili, I. and Müller, F. and Mchedlishvili, D. and Shergelashvili, D. *A new approach: LYSO based polarimetry for the EDM measurements*, J. Phys. Conf. Ser. **1162**, 012029 (2019).
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1162/1/012029>
- [46] Texas Instruments *Precision Voltage Regulators*, 2017.
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ua723.pdf>
- [47] Texas Instruments *LM158/LM258/LM358/LM2904 Low Power Dual Operational Amplifiers*, 2017.
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm158-n.pdf>
- [48] Maxim Integrated *MAX6325/41/50 DS*, 2001.
<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX6325-MAX6350.pdf>
- [49] Texas Instruments *OPA_x227 and OPA_x228 High Precision, Low Noise Operational Amplifiers*, 2017.
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa4228.pdf>
- [50] CERN *ROOT a Data Analysis Framework*, 2014-2021.
<https://root.cern.ch/>

- [51] Analog Devices, Inc. *36 V, 18 MHz, Low Noise, Fast Settling Single Supply, RRO, JFET Op Amp*, 2017–2019
<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADA4625-1-4625-2.pdf>
- [52] Analog Devices, Inc. *LTC3260 Low Noise Dual Supply Inverting Charge Pump*
<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ltc3260.pdf>
- [53] Hamamatsu Photonics *S1227-16BR For UV to visible, precision photometry*
<https://www.hamamatsu.com/eu/en/product/optical-sensors/photodiodes/si-photodiodes/S1227-16BR.html>
- [54] Red Pitaya *Red Pitaya*, 2021.
<https://www.redpitaya.com/index2>
- [55] Canny edge detector
https://en.wikipedia.org/wiki/Canny_edge_detector
- [56] Zybo Z7-20 Pcam 5C Demo
<https://digilent.com/reference/learn/programmable-logic/tutorials/zybo-z7-pcam-5c-demo/start>
- [57] Digilent Vivado library
<https://github.com/Digilent/vivado-library>
- [58] B&W CMOS 1 Megapixel (1280x800) Image Sensor with OmniPixel[®]3-GS Technology
<https://www.ovt.com/products/ov09281-h64a/>
- [59] ov5640 product brief
https://digilent.com/reference/_media/reference/add-ons/pcam-5c/ov5640_product_brief.pdf
- [60] Pcam 5C: 5 MP Fixed-Focus Color Camera Module
<https://digilent.com/shop/pcam-5c-5-mp-fixed-focus-color-camera-module/>
- [61] IMX219PQH5-C
<https://www.opensourceinstruments.com/Electronics/Data/IMX219PQ.pdf>

- [62] FPGA Fundamentals
<https://www.ni.com/de-de/innovations/white-papers/08/fpga-fundamentals.html>
- [63] MIPI CSI-2 Receiver on FPGA , USB 3.0 UVC 2Gbps Video Stream Over Cypress FX3
https://github.com/circuitvalley/mipi_csi_receiver_FPGA
- [64] MIPI CSI Controller Subsystems
<https://www.xilinx.com/products/intellectual-property/ef-di-mipi-csi-rx.html>
- [65] Understanding Camera Sensors for Machine Vision Applications
<https://www.edmundoptics.eu/knowledge-center/application-notes/imaging/understanding-camera-sensors-for-machine-vision-applications/>
- [66] What are the benefits of CMOS based machine vision cameras vs CCD
<https://www.1stvision.com/machine-vision-solutions/2019/07/benefits-of-cmos-based-machine-vision-cameras-vs-ccd.html>
- [67] University of Ferrara *Homepage*, 2021.
<http://www.unife.it/international>
- [68] Abdul Waheed Malik and Benny Thörnberg and Xin Cheng and Najeem Lawal *Real-time Component Labelling with Centre of Gravity Calculation on FPGA*,(2011).
- [69] Tektronix *Keithley Series 2700 Multimeter/Data Acquisition/Switch Systems*, 2021.
<https://www.tek.com/keithley-switching-and-data-acquisition-systems/keithley-2700-multimeter-data-acquisition-switch-sys>
- [70] Analog Device *ADG5206/ADG5207 (Rev. A)*, 2012-2013.
https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADG5206_5207.pdf
- [71] Vishay Siliconix *8-Ch/Dual 4-Ch High-Performance CMOS Analog Multiplexers*, 2017.
<https://www.vishay.com/docs/70062/dg408.pdf>
- [72] Texas Instruments *LM117HV/LM317HV 3-Terminal Adjustable Regulator datasheet (Rev. D)*, 2017.
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm317hv.pdf>

- [73] Bourns, Inc. *TIP36, TIP36A, TIP36B, TIP36C PNP SILICON POWER TRANSISTORS*, 2002.
<https://www.mouser.com/datasheet/2/54/tip36-49435.pdf>
- [74] Vishay Siliconix *IRFZ34, SiHFZ34 Power MOSFET*, S11-0517-Rev. B, 21-Mar-11.
<https://www.vishay.com/docs/91290/91290.pdf>
- [75] ON Semiconductor *2N5190G, 2N5191G, 2N5192G Silicon NPN Power Transistors*, 2013.
<https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/2n5191-d.pdf>
- [76] Microsemi Corporation *Low Voltage Avalanche 500 mW Zener Diodes DO-35*, December, 2011
https://eu.mouser.com/datasheet/2/268/LDS_0037_1-1592446.pdf
- [77] Analog Device *Fast 60V Protected High Side NMOS Static Switch Driver*, December, 2018.
<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ltc7003.pdf>
- [78] Microchip *16-Bit I/O Expander with Open-Drain Outputs*, 2008.
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22103a.pdf>
- [79] Altium Limited *Homepage*, 2020.
<https://www.altium.com>
- [80] National Instruments Corporation *Homepage*, 2020.
<https://www.ni.com>
- [81] TEKTRONIX, INC. *MDO3000 Series Datasheet*, 2022.
<https://www.tek.com/en/datasheet/mixed-domain-oscilloscopes>
- [82] Otari Javakhishvili *Power Supply Development for JEDI Polarimetry, Agricultural University of Georgia Tbilisi, Georgia*, 2018.
https://collaborations.fz-juelich.de/ikp/jedi/public_files/theses/Master_Thesis_Otari_Javakhishvili.pdf
- [83] Otari Javakhishvili *Development of a multi-channel power supply for silicon photo-multipliers reading out inorganic scintillators* Nuclear Instruments and Methods in

Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 0168-9002, 977, 164337, 2020

<https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164337> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900220307348>

[84] V.Chmill et al., Nuclear Instruments and Methods A **854**, 70 (2017).

[85] Toellner *TOE8733*, 2020.

https://www.toellner.de/datenblaetter/en_8732_8735.pdf

[86] Fabian Müller, *Polarimeter Development for Electric Dipole Moment Measurements in Storage Rings* Physics Institute III B, RWTH Aachen, 2019.

http://collaborations.fz-juelich.de/ikp/jedi/public_files/theses/thesis_fabian_mueller_final_version.pdf

[87] WIENER *MPOD LV Module*

<http://www.wiener-d.com/sc/power-supplies/mpod--lvhv/mpod-lv-module.html>

[88] CAEN *A1539B*

<https://www.caen.it/products/a1539b>

[89] HAMAMATSU *C11204-01*

https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/cC11204-0111204-01_kacc1203e.pdf

[90] CAEN *A7585D/DU*

<https://www.caen.it/subfamilies/up-to-85-v-power-supply-module-for-sipm-a7585d>

[91] R. A. Shukla V. G. Achanta, S. R. Dugad et al. *Multi-channel programmable power supply with temperature compensation for silicon sensors*, Rev Sci Instrum. **87**, 015114 (2016).

<https://doi.org/10.1063/1.4940424>

[92] The Pierre Auger collaboration *Muon Counting using Silicon Photomultipliers in the AMIGA detector of the Pierre Auger Observatory*, 2017.

<https://arxiv.org/pdf/1703.06193.pdf>

- [93] A. Gil and J. Rodríguez and V. Álvarez and J. Díaz and J. Gómez-Cadenas and D. Lorca *2011 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*, **787-790** (2011).
<https://doi.org/10.1109/NSSMIC.2011.6154298>
- [94] Hamamatsu R1548-07. 24 x 24 mm Rectangular dual, Head-on type, Bi-alkali photocathode (Effective area : 8 x 8 x (2) mm /Spectral response : 300 to 650 nm)
<http://www.hamamatsu.com/us/en/R1548-07.html>
- [95] F. Abusaif *et al.*, *Development of compact highly sensitive beam position monitors for storage rings* *Hyperfine Interact* **240**, 4 (2019).
<https://doi.org/10.1007/s10751-018-1543-x>
- [96] W. Haeberli, *Sources of Polarized Ions*, *Ann. Rev. Nucl. Sci.* **17**, 373 (1967).
<https://doi.org/10.1146/annurev.ns.17.120167.002105>
- [97] D. Chiladze *et al.*, *Determination of deuteron beam polarizations at COSY*, *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **9**, 050101 (2006).
<https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.9.050101>