SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET

Sandra Horvat

Laserski sustav ALMY za precizno određivanje položaja detektora tragova čestica

Magistarski rad

Zagreb, Travanj 10, 2002

Sandra Horvat

Laserski sustav ALMY za precizno određivanje položaja detektora tragova čestica

Magistarski rad

predložen Fizičkom odsjeku
Prirodoslovno-matematičkog fakulteta u Zagrebu
radi stjecanja akademskog stupnja
magistra prirodnih znanosti

Zagreb, 2002.

Sveučilište u Zagrebu
Prirodoslovno-matematički fakultet
Fizički odsjek

Magistarski rad

Laserski sustav ALMY za precizno određivanje položaja detektora tragova čestica

Sandra Horvat

Rad je izrađen na Max Planck Institutu za fiziku, München, Njemačka,
te na Institutu Ruđer Bošković, Zagreb, Hrvatska

Rad sadrži: 118 stranica, 82 slike, 18 tablica, 32 literaturna navoda, jezik izvornika hrvatski

Rad je pohranjen u knjižnici Prirodoslovno-matematičkog fakulteta - Zagreb

Ključne riječi: poluvodički laseri/ optoelektronički senzori položaja / amorfni silicij / detektori tragova čestica / ATLAS

Voditelj rada: dr. Krešo Kadija

Ocjenjivači:

Rad prihvaćen:

Sadržaj

1

Uvod

Neka predviđanja standardnog modela u fizici elementarnih čestica, kao i predviđanja teorija izvan standardnog modela (tzv. "nove fizike") mogu se eksperimentalno provjeriti jedino u fizikalnim procesima koji se odvijaju pri vrlo visokim energijama čestica (reda veličine 1 TeV). Jedno od takvih još nedovoljno istraženih područja odnosi se na mehanizam spontanog lomljenja elektroslabe simetrije, koji predviđa postojanje jedne ili više Higgsovih čestica. Temeljna razmatranja koja vode do ovih predviđanja bit će iznesena u sljedećem poglavlju.

Eksperimentalo opažanje predviđenih fizikalnih stanja doprinijelo bi boljem razumijevanju pitanja porijekla masa čestica. **L**arge **H**adron **C**ollider (LHC) na CERN-u (**C**entre **E**uropéene pour la **R**echerche **N**ucleaire) pripada novoj generaciji akceleratora čestica koji će omogućiti eksperimente s pogledom u spomenuto područje visokih energija. Njegovo se dovršenje planira oko 2006. godine. U sklopu LHC projekta gradi se detektor ATLAS kojim će se prvenstveno tragati za Higgsovim bozonom. U trećem poglavlju bit će opisane temeljne značajke eksperimenta ATLAS, s usmjerenjem na mionski spektrometar kao jedan od bitnih sastavnih dijelova čitavog detektora. U tom će poglavlju također biti objašnjena potreba za preciznim poznavanjem položaja različitih komponenti mionskog spektrometra.

Poglavlja koja slijede sadrže eksperimentalni dio rada, izrađen na Max Planck Institutu za fiziku u Münchenu. Tema tih poglavlja razvoj je jednog od optičkih sustava (sustav ALMY) za precizno mjerenje položaja detektora tragova čestica, koji je prvobitno razvijen za upotrebu u spomenutom spektometru.

Sustav ALMY čine precizni optoelektonički senzori položaja, opisani u četvrtom poglavlju. U petom poglavlju navode se prvobitni nedostaci tih senzora. Opaženi nedostaci vode ka razvoju druge generacije senzora, poboljšanih značajki. Šesto, sedmo i osmo poglavlje iznose rezultate detaljnih laboratorijskih ispitivanja novih senzora. Time je omogućeno dobro razumijevanje rada sustava, što je preduvjet za postizanje bolje učinkovitosti u mjerenju položaja. Ispitivanje učinkovitosti sustava ALMY opisano je u devetom poglavlju.

Prethodno spomenuta ispitivanja ukazuju na mogućnost dodatnih poboljšanja, koja će biti spomenuta u desetom poglavlju.

Naposljetku se iznose zaključci o mogućnostima primjene sustava ALMY za precizno mjerenje položaja.

2

Higgsov mehanizam

Mehanizam spontanog lomljenja elektroslabe simetrije [1] ključni je dio modela ujedinjenog slabog i elektromagnetskog međudjelovanja u teoriji elementarnih čestica. Propagatori međudjelovanja, kao i ostale čestice (elektroni, mioni, neutrini) u početnoj su SU(2)xU(1) invarijantnoj Lagrangeovoj funkciji (2.1) bezmaseni.

$$L = i\bar{R}\gamma^\mu(\partial_\mu + ig'X_\mu)R + i\bar{L}\gamma^\mu\left(\partial_\mu + \frac{i}{2}g'X_\mu - \frac{i}{2}g\tau\cdot\mathbf{W}_\mu\right)L - \tag{2.1}$$

$$\frac{1}{4}\left(\partial_\mu W_\nu - \partial_\nu W_\mu + gW_\mu \times W_\nu\right)^2 - \frac{1}{4}\left(\partial_\mu X_\nu - \partial_\nu X_\mu\right)^2$$

Lijeva elektronska i neutrinska komponenta dane su dubletom $L = \begin{pmatrix} \nu_e \\ e_L \end{pmatrix}$, a desna elektronska komponenta singletom $R = e_R$. Njima se zbog SU(2) simetrije pripisuje naboj slabog izospina I_W. Treća komponenta tog naboja je za ν_e jednaka $I_W^3 = \frac{1}{2}$, za e_L ona iznosi -$\frac{1}{2}$, dok je u izosingletu $I_W^3 = 0$. Posljedica U(1) simetrije je očuvanje slabog hipernaboja Y_W. Kvazi-Gell-Mann-Nishijima relacija (2.2) povezuje ove naboje s elektromagnetskim nabojem Q.

$$Q = I_W^3 + \frac{Y_W}{2} \tag{2.2}$$

Invarijantnost Lagrangeove funkcije ostvarena je uvođenjem baždarnih potencijala W_μ^i (SU(2) simetrija), te X_μ (U(1) simetrija), koji ulaze u kovarijantne derivacije. Pritom je g jakost vezanja treće komponente izospinske struje fermiona s poljem $\mathbf{W}_\mu$, a g' je jakost vezanja fermionske struje slabog hipernaboja s poljem X_μ. τ^i $(i = 1, 2, 3)$ su Paulijeve matrice spina.

Sve dosad otkrivene čestice sudjeluju u slabom međudjelovanju do područja vrlo visokih energija. Opaženo narušenje elektroslabe simetrije objašnjeno je uvođenjem dodatnog izospinornog skalarnog polja (Higgsovo polje) Φ (2.3),

$$\Phi = \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix} \phi_3 + i\phi_4 \\ \phi_1 + i\phi_2 \end{pmatrix}, \tag{2.3}$$

gdje su ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 i ϕ_4 realni.

Lagrangeova funkcija koja opisuje samointerakciju uvedenog skalarnog sektora (λ je jakost Higgsove samointerakcije, a m je parametar mase), kao i međudjelovanje jakosti G_e tog sektora s leptonima dana je izrazom 2.4.

$$L_s = (D_\mu \Phi)^\dagger (D_\mu \Phi) - \frac{m^2}{2} \Phi^\dagger \Phi - \frac{\lambda}{4} (\phi^\dagger \Phi)^2 - G_e (\bar{L} \Phi R + \bar{R} \Phi^\dagger L) \tag{2.4}$$

Kovarijantna derivacija (2.5) osigurava baždarnu invarijantnost međudjelovanja skalarnog sektora s postojećim vektorskim bozonima.

$$D_\mu \Phi = \left(\partial_\mu - \frac{i}{2} g \tau \cdot \mathbf{W}_\mu - \frac{i}{2} g' X_\mu \right) \Phi \tag{2.5}$$

Ako je parametar $m^2 < 0$, najniže energijsko stanje različito je od nule, tj. simetrija je spontano slomljena,

$$| < 0|\Phi|0 > |^2 = -\frac{m^2}{\lambda} = \frac{v^2}{2} \neq 0 \tag{2.6}$$

gdje je v očekivana vrijednost vakuuma.

Kao posljedica spontanog lomljenja elektroslabe simetrije, prvobitno bezmaseni baždarni bozoni i leptoni poprimaju masu. Naime, fluktuacije oko vakuuma opisane su izrazom

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v + H(x) \end{pmatrix}. \tag{2.7}$$

Uvrštavanjem u kinetički član Lagrangeove funkcije L_s slijedi:

$$(D_\mu \Phi)^\dagger (D_\mu \Phi) = \frac{1}{2} (\partial_\mu H)^2 + \frac{g^2 v^2}{8} [(W_\mu^1)^2 + (W_\mu^2)^2] + \frac{v^2}{8} (g W_\mu^3 - g' X_\mu)^2 + ... \tag{2.8}$$

Vlastitim stanjima mase pridružene su odgovarajuće linearne kombinacije vektorskih bozona, koje se manifestiraju kao fizikalne čestice:

$$W_\mu^\pm = \frac{W_\mu^1 \pm i W_\mu^2}{\sqrt{2}}, \qquad M_W = \frac{gv}{2}$$

$$Z_\mu = -B_\mu \sin\theta_W + W_\mu^3 \cos\theta_W, \qquad M_Z = \frac{\sqrt{g^2 + g'^2}\, v}{2} = \frac{M_W}{cos\Theta_W}$$

$$A_\mu = B_\mu \cos\theta_W + W_\mu^3 \sin\theta_W, \qquad m_\gamma = 0$$

Pritom je Weinbergov kut Θ_W (kut slabog miješanja) definiran relacijom

$$g' = g\, tan\Theta_W. \tag{2.9}$$

Polje A_μ identificira se s propagatorom elektromagnetskog, a W_μ i Z_μ s propagatorima slabog međudjelovanja. Predviđene mase baždarnih bozona (uz iznos očekivane vrijednosti vakuuma od $v \approx 246$ GeV) u dobrom su slaganju s eksperimentalno izmjerenima [2].

1971. godine 't Hooft dokazuje renormalizabilnost ove teorije elektroslabog međudjelovanja [3], čime ona postaje ozbiljno shvaćana. (U renormalizabilnoj teoriji se perturbativnim računom za fizikalne veličine kao što su mase, konstante vezanja i sl. uvijek mogu dobiti konačne vrijednosti, tj. mogu se izbjeći divergencije.) Danas je to jedno od temeljnih područja interesa eksperimentalne fizike, u prvom redu zbog predviđanja da se komponenta H skalarnog polja manifestira kao nova fizikalna čestica, Higgsov bozon [4] mase

$$M_H = \sqrt{2\lambda}v. \tag{2.10}$$

Jakost Higgsove samointerakcije (λ) u standardnom je modelu slobodan parametar, pa teorija ne može točno predvidjeti masu ove čestice. Zahtjev unitarnosti postavlja gornju granicu od $\sim$1 TeV [5]. Zahtjevi na stabilnost elektroslabog vakuuma, te na mogućnost primjene perturbativnog računa postavljaju donju [6] i gornju [7] granicu u ovisnosti o energijskoj skali Λ u okviru koje je definiran standardni model. Uz odabir Λ=1 TeV masa Higgsovog bozona ograničena je na područje između 50 i 800 GeV. Eksperimentalna potraga (LEP2) postavlja donju granicu $M_H >$90 GeV [8]. Najnoviji LEP2 rezultati daju naznake za postojanje Higgsovog bozona mase $\sim$115 GeV [9]. Nažalost, rezultat mjerenja nije statistički pouzdan, a i sama interpretacija rezultata još uvijek je puna kontradikcija.

Jedan od nedostataka standardnog modela je problem "neprirodnog" poništavanja divergentnih članova (reda veličine 10^5 GeV) koji se javljaju uslijed radijativnih korekcija mase Higgsovog bozona. Elegantan mehanizam poništavanja divergencija daje teorija supersimetrije [10] za koju zasad ne postoje eksperimentalni dokazi. Supersimetrični modeli postuliraju postojanje superpartnera za svaki opaženi bozon i fermion. U minimalnom supersimetričnom proširenju standardnog modela (MSSM) Higgsov sektor sastoji se od dva dubleta, a spontano lomljenje elektroslabe simetrije rezultira sa dva nabijena ($H^\pm$) i tri neutralna (h, H, A) fizikalna stanja. Proučavanje tog sektora time postaje znatno složenije nego u standardnom modelu. Mase Higgsovih bozona mogu se izraziti putem dva parametra - mase M_A, te omjera očekivanih vrijednosti vakuuma dvaju Higgsovih dubleta tan β. Mogućnost opažanja pojedinih Higgsovih čestica ovisi o iznosima ova dva parametra. Predviđa se da se mase teških bozona ($H^\pm$, H, A) nalaze u području očekivane vrijednosti vakuuma, ali nisu isključene vrijednosti i do 1 TeV. Masa lake Higgsove čestice je u području od 100 do 130 GeV.

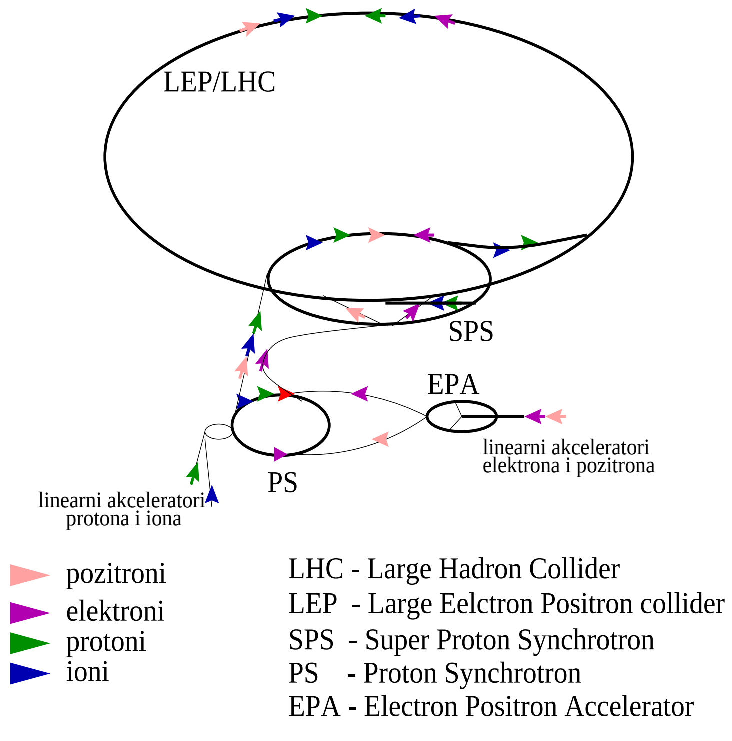
Potraga za Higgsovom česticom (česticama) još uvijek nije urodila plodom. Velik dio istraživanja nove generacije visokoenergijskih eksperimenata, na energijama reda veličine TeV, bit će usmjeren upravo na ovo područje fizike.

3

Eksperiment ATLAS

3.1 Akcelerator LHC

Large **H**adron **C**ollider (LHC) [11] u CERN-u (**C**enter **E**uropéene pour la **R**echerche **N**ucleaire) je budući sudarivač snopova protona na dosad najvećim energijama od 14 TeV u sustavu centra masa, kao i snopova teških iona pri ukupnoj energiji sudara od 1250 TeV. Za njegovu izgradnju iskoristit će se već postojeći 27-kilometarski tunel LEP-a (**L**arge **E**lectron **P**ositron collider), a magnetsko polje od 8.36 T ostvarit će se upotrebom supravodljivih materijala. Uz nominalnu luminoznost od L=10^{34} cm^{-2}s^{-1} i vremenski interval sudara snopova od 25 ns prosječan broj interakcija (događaja) po sudaru iznosi 23. Linearnim akceleratorima i SPS-om (**S**uper **P**roton **S**ynchrotron) snopovi se prethodno ubrzavaju do energija od 0.45 TeV (vidi sliku 3.1).



Slika 3.1: Sklop akceleratora u CERN-u.

Na LHC-u su predviđene četiri zone sudaranja. Sudare protonskih snopova istraživat će eksperimenti ATLAS (**A** **T**oroidal **L**HC **A**pparatu**S**, [12]) i CMS (**C**ompact **M**uon **S**pectrometer, [13]), prvenstveno usmjereni na proučavanje mehanizma spontanog lomljenja elektroslabe simetrije, te LHC-b [14], dizajniran za proučavanje CP-narušenja u raspadima B-mezona. Za traženje i proučavanje svojstava kvarkovsko-gluonske plazme dizajniran je eksperiment ALICE (**A** **L**arge **I**on **C**ollider **E**xperiment, [15]).

3.2 Detektor ATLAS

Kao što je već spomenuto, temeljna odrednica eksperimenta ATLAS jest proučavanje mehanizma spontanog lomljenja elektroslabe simetrije, tj. potraga za jednom ili više Higgsovih čestica. Konstrukcija samog detektora usmjerena je upravo na mogućnost detekcije u čitavom dozvoljenom području masa. Ostali važni ciljevi su i potraga za supersimetričnim česticama, novim baždarnim bozonima, te CP-narušenjem u raspadima B-mezona. Visoka energija i luminoznost LHC-a omogućit će i znatno preciznije mjerenje masa W bozona i t-kvarka. Ove odrednice postavljaju visoke zahtjeve na konstrukciju samog detektora.

Detektor ATLAS ([12], [16]) prikazan je na slici 3.2. Geometrija je definirana koordinatnim sustavom s ishodištem u primarnom verteksu (mjesto sudara protonskih snopova), a x, y i z smjer naznačeni su na slici 3.2. Azimutalni kut ϕ definiran je oko z-osi, a polarni kut θ je kut prema toj osi. Pseudorapiditet je definiran polarnim kutom:

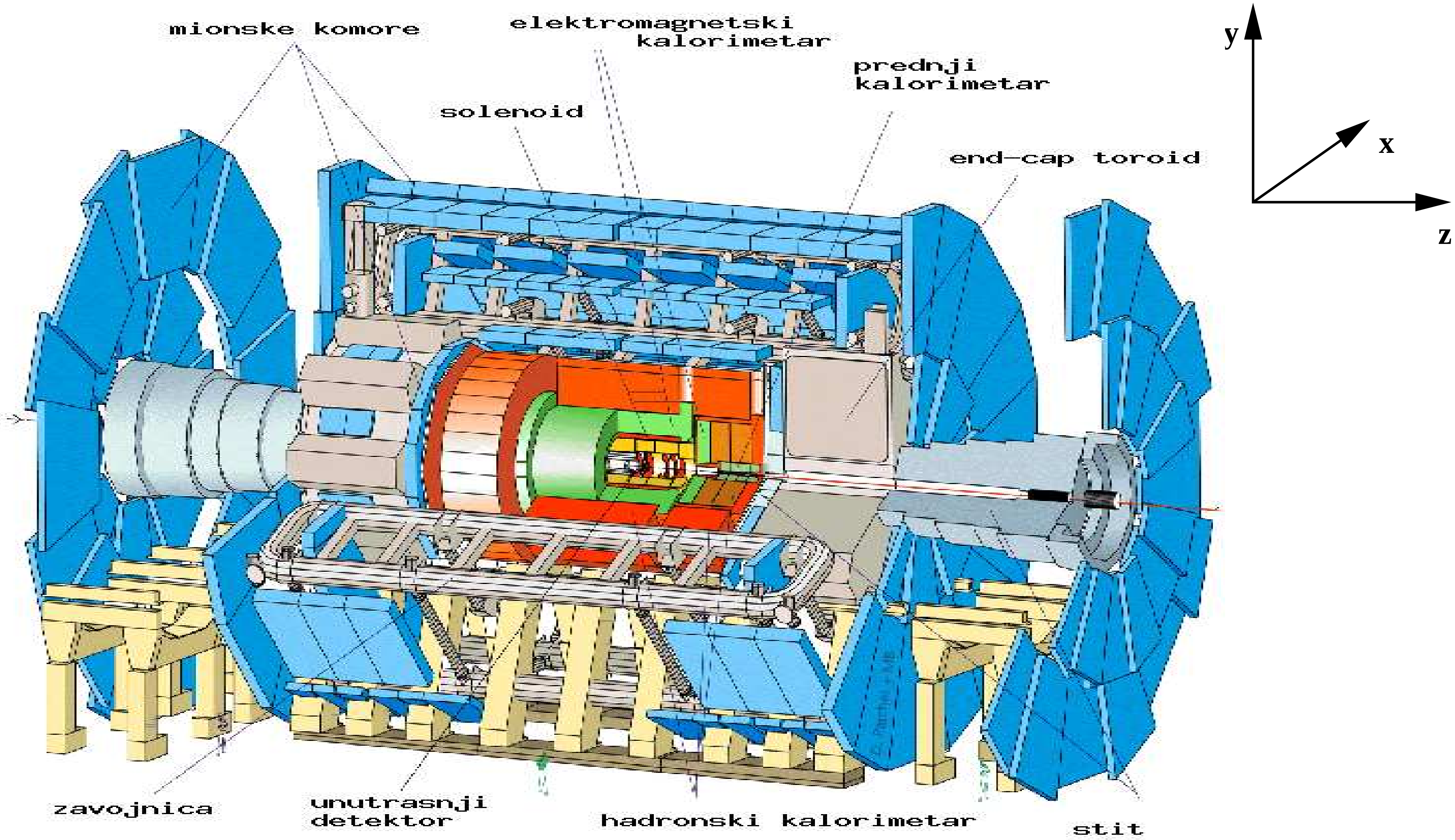
$$\eta = -ln \quad tan\frac{\theta}{2} \tag{3.1}$$

Transverzalne varijable (transverzalni impuls p_T, transverzalna energija E_T) definirane su u xy-ravnini.

Brojne studije fizikalnih procesa postavljaju zahtjeve na dizajn detektora ATLAS. Potrebna je vrlo dobra elektromagnetska kalorimetrija za mjerenje energije elektrona i fotona, te precizna hadronska kalorimetrija za mlazeve. Zahtjeva se visoka preciznost mjerenja mionskih impulsa. Potrebno je učinkovito praćenje tragova visokoenergijskih leptona pri visokoj luminoznosti, učinkovita identifikacija τ-leptona i hadrona s teškim kvarkovima, kao i potpuna rekonstrukcija događaja pri niskoj luminoznosti. Zahtjeva se pokrivenost velikog područja pseudorapiditeta, uz gotovo potpunu pokrivenost azimutalnog kuta. Ove će odrednice biti ostvarene kombinacijom različitih komponenti detektora, koaksijalno raspoređenih u nekoliko slojeva oko vakuumske cijevi u zoni sudaranja, uz dva krajnja (*end-cap*) detektora na krajevima cilindra.

1. Unutrašnji detektor

Unutrašnji detektor [17] duljine 7 m i polumjera 1.5 m nalazi se u solenoidalnom magnetskom polju od 2 T. Poluvodičkim *piksel* i *strip* detektorima visoke razlučivosti u unutrašnjosti, te vučnim (*drift*) komorama na vanjskim rubovima omogućeno je precizno mjerenje impulsa, naboja i smjera nabijenih čestica, te određivanje položaja primarnog verteksa.



Slika 3.2: Detektor ATLAS.

2. Elektromagnetski kalorimetar

Unutrašnji detektor obavijen je elektromagnetskim kalorimetrom polumjera 2.25 m i duljine 13.5 m, što pokriva područje pseudorapiditeta $|\eta| <3.2$. Sastoji se od olovnih ploča (debljine 1.5 m) međusobno razmaknutih 4 mm i okruženih tekućim argonom (LAr). Početna energija elektrona ili fotona se prolazom kroz olovne ploče transformira u energije brojnih niskoenergijskih elektrona i pozitrona (elektronski pljusak) koji ioniziraju tekući argon. Naboj se prikuplja elektrodama čiji prostorni raspored omogućuje, osim mjerenja energije, također i određivanje smjera upadnih čestica. To je osobito važno pri detekciji mlazeva.

3. Hadronski kalorimetar

Hadroni se apsorbiraju u sljedećem sloju polumjera 4.2 m i duljine 12.2 m, koji se sastoji od čeličnih i bakrenih ploča [18]. Nastali pljusak niskoenergijskih hadrona detektira se okolnim plastičnim scintilatorom. U području visokog pseudorapiditeta (do η=4.9) za hadronsku se detekciju zbog velikog intenziteta hadronskog pljuska upotrebljava tehnologija tekućeg argona.

4. Mionski spektrometar

Mionski spektrometar [19] polumjera 11 m i duljine 46 m definira ukupne dimenzije detektora ATLAS. Uz neutrine, mioni su jedine čestice koje prolaze kroz sva tri prethodna sloja. Detektiraju se vučnim komorama (ispunjenih mješavinom plinova Ar:CO_2 u omjeru 93:7) raspoređenim u tri cilindrična sloja oko z-osi, te tri sloja komora istog tipa u end-cap području. Ovaj dio detektora ATLAS može neovisno o ostalim dijelovima detektora vrlo precizno mjeriti mionske impulse. Optički sustav koji igra ključnu ulogu u ostvarenju tražene preciznosti tema je sljedećih poglavlja ovog rada.

Magnetsko polje potrebno za određivanje impulsa čestica dobiva se upotrebom tankog supravodljivog solenoida koji okružuje unutrašnji detektor, te velikih supravodljivih toroida sa zračnom jezgrom koji se sastoje od nezavisnih zavojnica raspoređenih u osmerostrukoj simetriji izvan kalorimetra [20]. U unutrašnjem detektoru time je ostvareno solenoidalno polje od 2 T, a u mionskom spektrometru jakost je polja do 4.1 T. Prednost zračne jezgre je minimiziranje efekata višestrukog raspršenja.

U sljedećem odlomku razmotrena su predviđanja efikasnosti detektora ATLAS u otkrivanju Higgsove čestice predviđene standardnim modelom.

3.3 Mogućnost detekcije Higgsove čestice

Standardni model predviđa nekoliko kanala raspada Higgsove čestice. Zastupljenost pojedinog kanala u ukupnom signalu ovisi o masi Higgsovog bozona (m_H).

• $H \to b\bar{b}$

Ovaj kanal dominira, s visokim omjerom grananja od ~90%, ako je 80<m_H <100 GeV. Detekcija direktno producirane Higgsove čestice, $gg \to H \to b\bar{b}$, nije moguća zbog velikog pozadinskog signala od dvaju mlazeva. Moguće je detektirati $H \to b\bar{b}$ kanal za Higgs nastao pridruženom produkcijom s W ili Z bozonom, te $t\bar{t}$ parovima. Leptonskim raspadom W-bozona i semileptonskim raspadom jednog od t-kvarkova nastaju leptoni velikog transverzalnog impulsa p_T koji služe za identifikaciju (*triggering*) ovog kanala.

• $H \to \gamma\gamma$

U području masa 90<m_H <150 GeV udarni presjek produkcije Higgsovog bozona i omjer grananja su dovoljno veliki za detekciju ovog kanala. Higgs može nastati direktno gg međudjelovanjem, te pridruženom produkcijom s W ili Z bozonom ili $t\bar{t}$ parom. Detekcija ovog kanala postavlja visoke zahtjeve na efikasnu kalorimetriju u detektoru.

• $H \to ZZ^* \to 4l^{\pm}$

Ovaj kanal pokriva mase u području 130<m_H <800 GeV. Omjer grananja ima minimum u području do 180 GeV zbog otvaranja $H \to WW$ kanala, a za veće mase smatra se najpouzdanijim za detekciju Higgsovog bozona. Znatan doprinos pozadinskog signala postavlja zahtjeve na precizno mjerenje impulsa nastalih leptona.

• $H \to ZZ \to 4l^{\pm}$

Ovo je najpouzdaniji (*"pozlaćeni"*) kanal u području masa 150<m_H <700 GeV. Rekonstrukcija signala uvjetovana je opažanjem četiri leptona u području pseudorapiditeta $|\eta|$ <2.5. Očekivani pozadinski signal (u kojem dominira produkcija parova Z bozona) manji je od samog signala. Prirodna širina rezonance snažno raste s m_H i postaje veća od eksperimentalne razlučivosti mase. Impulsi nastalih leptona su veliki (dva vodeća leptona imaju p_T >20 GeV, a dva preostala p_T >7 GeV), pa mjerenje impulsa ovdje ne postavlja visoke zahtjeve na dizajn detektora. Mogućnost detekcije ograničena je prvenstveno dostupnom luminoznošću.

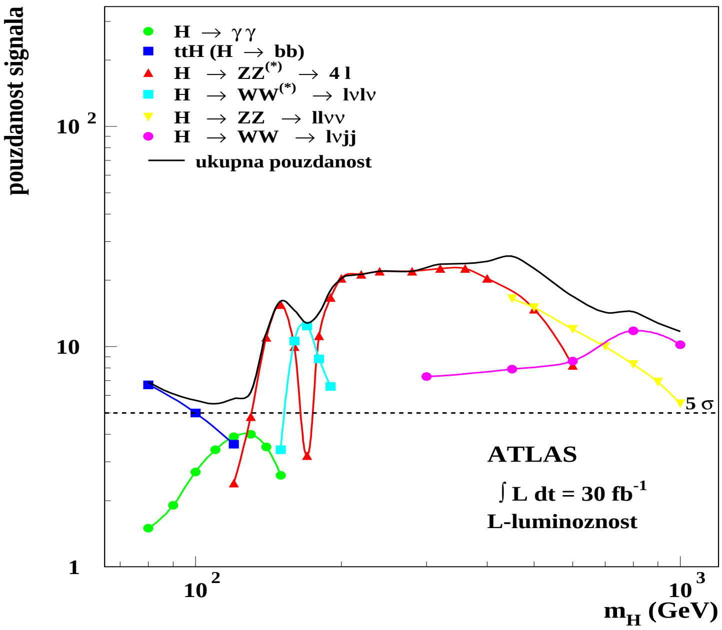
• $H \to WW, ZZ \to l\nu jj$

Kanal koji se može primijeniti za detekciju vrlo masivnih Higgsovih bozona, do približno m_H=1000 GeV. Identifikator procesa su mlazevi (j) nastali raspadom W, odnosno Z bozona.

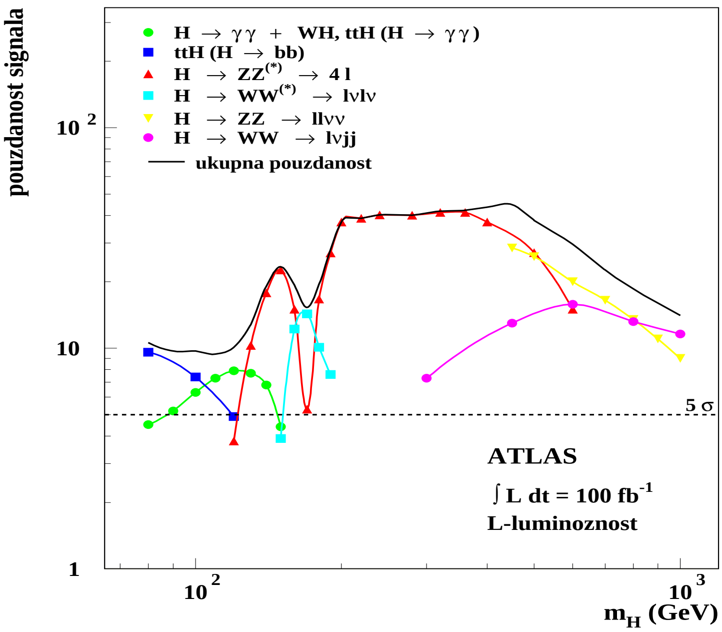
Za svaki od ovih kanala računalno je simulirana pouzdanost signala P, definirana relacijom 3.2

$$P = \frac{S}{\sqrt{B}}, \tag{3.2}$$

gdje je S broj pravih, a B broj pozadinskih događaja. Za simulaciju procesa nastalih pp sudarima upotrebljeni su Monte Carlo generatori događaja (HERWIG [21], ISAJET [22], PYTHIA [23]). Slike 3.3 i 3.4 prikazuju ovisnost pouzdanosti signala o masi Higgsovog bozona za različite kanale raspada, u slučaju niske (L=10^{33} cm^{-2}s^{-1}) i visoke (L=10^{34} cm^{-2}s^{-1}) luminoznosti.

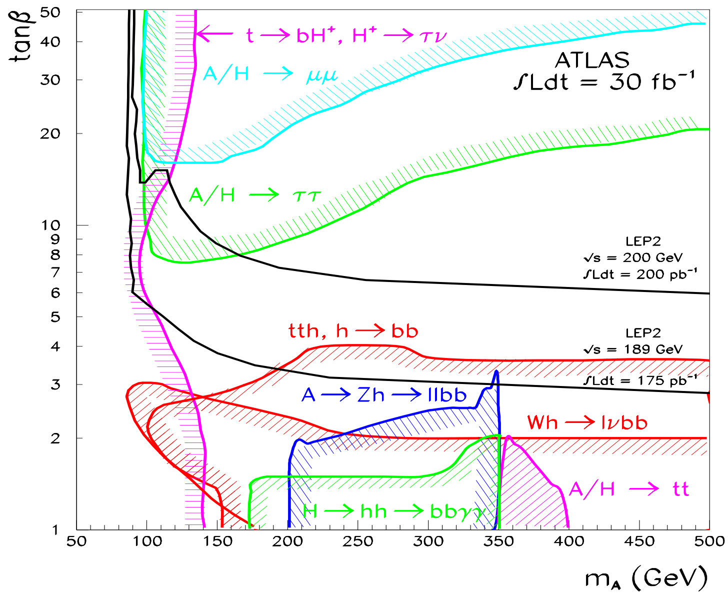


Slika 3.3: Pouzdanost signala nakon tri godine rada detektora, pri niskoj luminoznosti L=10^{33} cm^{-2}s^{-1}.

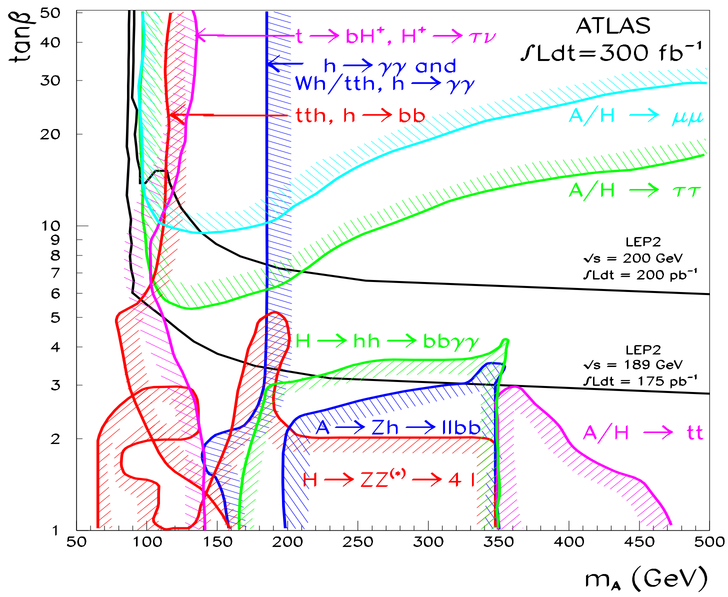


Slika 3.4: Pouzdanost signala nakon jedne godine rada detektora, pri visokoj luminoznosti L=10^{34} cm^{-2}s^{-1}.

U MSSM modelu predviđen je velik broj kanala raspada Higgsovih čestica. Područje interesa usredotočeno je na razne kanale raspada koji su mogući i u standardnom modelu ($h \to \gamma\gamma$, $h \to b\bar{b}$, $H \to ZZ \to 4l$), te na kanale koji dolaze do izražaja pri velikim iznosima tanβ ($H/A \to \tau\tau$, $H/A \to t\bar{t}$, $A \to Zh$, $H \to hh$). Slike 3.5 i 3.6 prikazuju 5σ razine pouzdanosti pojedinih kanala u ovisnosti o parametrima m$_A$ i tanβ, pri niskoj i visokoj luminoznosti.



Slika 3.5: 5σ razine pouzdanosti raznih kanala raspada MSSM Higgsovih čestica, pri niskoj luminoznosti L=10^{33} cm^{-2}s^{-1}.



Slika 3.6: 5σ razine pouzdanosti raznih kanala raspada MSSM Higgsovih čestica, pri visokoj luminoznosti L=10^{34} cm^{-2}s^{-1}.

3.4 Nadgledanje položaja MDT komora

3.4.1 Odrednice mionskog spektrometra

Jedan od temeljnih zahtjeva u konstrukciji detektora ATLAS je precizno određivanje impulsa miona detektiranih MDT (**M**onitored **D**rift **T**ubes) komorama u mionskom spektrometru. Nekoliko je fizikalnih procesa koji daju odrednice efikasnosti tog dijela detektora ATLAS.

Na primjer, za Higgs mase 120<m_H <170 GeV tipični transverzalni impulsi miona nastalih raspadom $H \to ZZ^* \to \mu\mu ll$ iznose 5<p_T <50 GeV. Budući da je širina Higgs rezonance u tom području vrlo mala, za dobru osjetljivost signala rezolucija mase mora bitno bolja od 1%. Zbog izotropnosti raspada vrlo je važna i dobra pokrivenost područja pseudorapiditeta. Područje od $|\eta|$ <2.7 obuhvaća više od 85% nastalih miona, dok bi pokrivenost od $|\eta|$ <2.5 obuhvatila samo 56% miona.

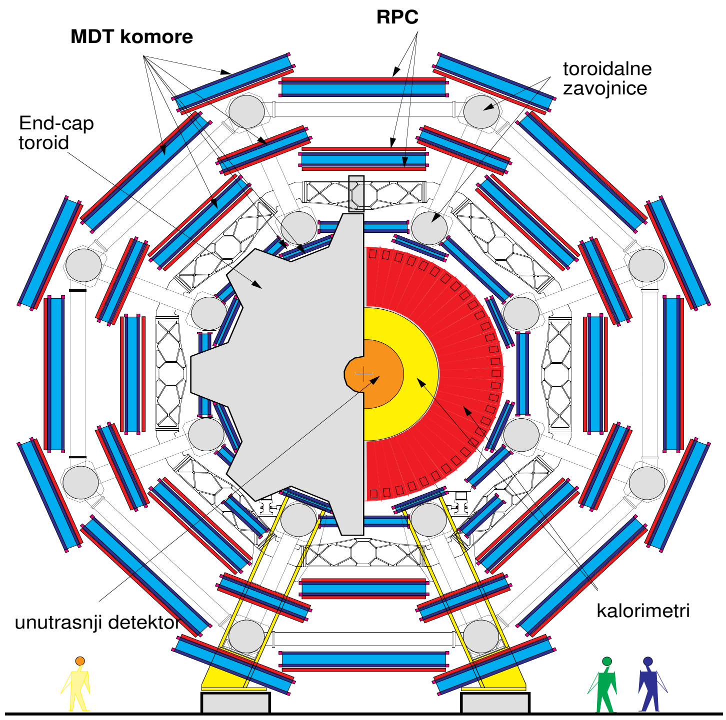
Osnovne odrednice navedene su u tablici 3.1.

parametar	**fizikalni proces**	**poželjni iznos**	**stvarni iznos**	**komentar**
$\frac{\Delta p_T}{p_T}$ pri 20 GeV	$H \to ZZ^* \to 4l$	1-2%	~2%	ograničenje višestrukim raspršenjem i gubicima energije
			~1.6%	kombinacija s unutrašnjim detektorom
$\frac{\Delta p_T}{p_T}$ pri 75 GeV	$H \to ZZ \to 4l$ (MSSM)	1-2%	~2.4%	ograničenje višestrukim raspršenjem i gubicima energije
			~2.0%	kombinacija s unutrašnjim detektorom
$\frac{\Delta p_T}{p_T}$ pri 1000 GeV	$Z^{'} \to \mu\mu$	nekoliko%	~11%	ograničenje identifikacijom naboja
područje pseudorapiditeta	gore navedeni procesi	~3	2.7	ograničenje omotačem detektora

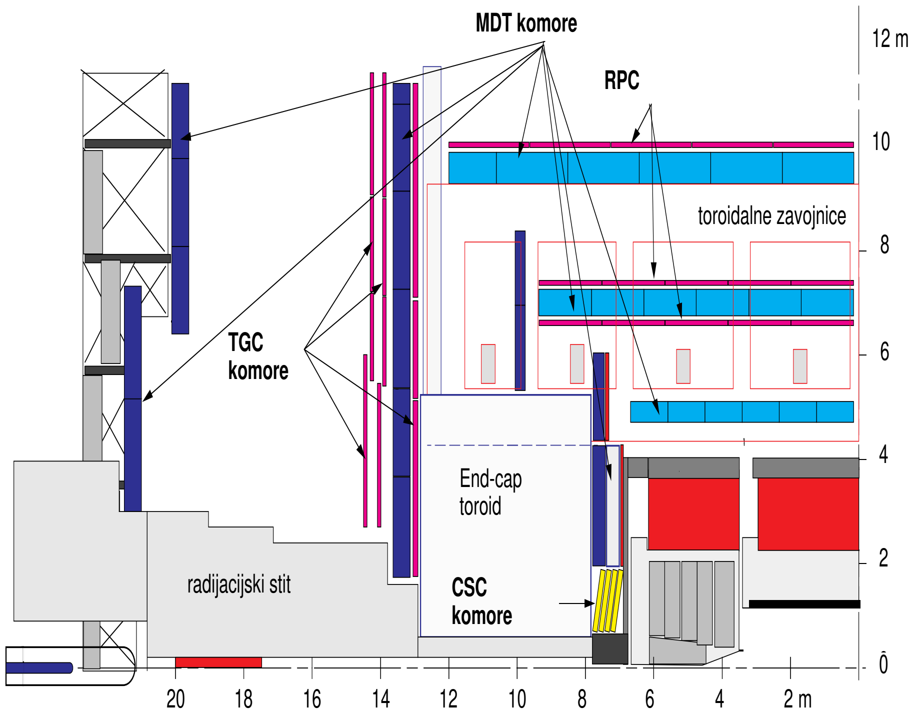
Tablica 3.1: Odrednice mionskog spektrometra.

3.4.2 Građa mionskog spektrometra

Slike 3.7 i 3.8 prikazuju poprečni (xy-ravnina) i uzdužni (rz-ravnina) presjek detektora ATLAS. MDT komora sastoji se od dva višesloja drift-cijevi odvojenih potpornom strukturom. Svaki višesloj sastoji se od 3 ili 4 sloja cijevi položenih jedna do druge. Cijevi (u čijem središtu se nalazi anodna žica pod naponom od 3000 V) su ispunjene mješavinom plina Ar:CO_2 (93:7). Vrijeme prikupljanja električnog impulsa nastalog prolazom miona kroz cijev daje infomaciju o položaju miona, s preciznošću od ~100 μm.



Slika 3.7: Presječni prikaz detektora ATLAS u xy-ravnini, tj. okomito na smjer protonskog snopa.



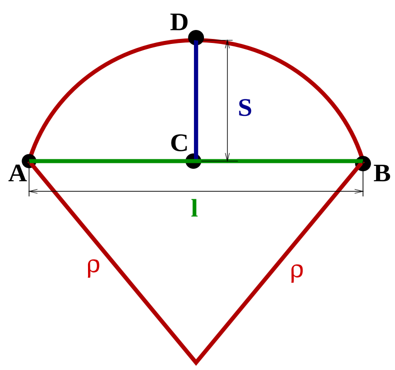
Slika 3.8: Presječni prikaz detektora ATLAS u rz-ravnini, tj. uzduž smjera protonskog snopa.

U području velikog pseudorapiditeta se zbog jakog zračenja MDT tehnologija zamjenjuje CSC-komorama (**C**athode **S**trip **C**hambers) tj. nizom paralelnih žica okruženih metalnim zidovima čiji oblik prati položaj žica. Prostor između zidova ispunjen je plinom. U sastavu određenih komora na sam MDT-sloj nadovezuje se i sloj detektora za okidni sustav - RPC komore (**R**esistive **P**late **C**hambers) u cilindričnom, te TGC (**T**hin **G**ap **C**hambers) u end-cap području.

Duž z-osi (**B**arrel) mionske su komore raspoređene u tri cilindrična sloja - unutrašnjem (**I**nner, BI), srednjem (**M**iddle, BM) i vanjskom (**O**uter, BO). Krajevi cilindra (**E**nd-cap) omeđeni su sa po četiri diska komora, koncentrična s osi protonskog snopa: unutrašnji (EI), dodatni (EE), središnji (EM) i vanjski (EO). Komore su u čitavom detektoru raspoređene tako da čestice producirane u točki interakcije prolaze kroz tri sloja komora. Širine komora odabiru se tako da se spojnice rubova triju komora (po jedna iz svakog sloja) sijeku u točki sudara dvaju protonskih snopova. Na taj način ove tri komore obuhvaćaju određeni smjer gibanja čestice (η) iz početne točke, tj. čine tzv. *projekcijski toranj*. Položaj slojeva odabran je tako da djelovanje magnetskog polja bude maksimalno iskorišteno. U cilindričnom dijelu spektrometra komore su najčešće pravokutnog, a u end-cap području trapezoidalnog oblika, radi pokrivanja cijelog kutnog područja. Ovakav prostorni raspored omogućuje mjerenje sagite (S) zakrivljenih tragova čestica.

Sagita je definirana na sljedeći način (vidi sliku 3.9): ako dvije krajnje točke A i B kružnog segmenta (polumjera ρ) spojimo pravcem (duljine l), udaljenost od središnje točke C na pravcu do kružnice (D) naziva se sagita, i izražena je relacijom

$$S = \rho(1 - cos\alpha), \quad sin\alpha = \frac{l}{2\rho} \tag{3.3}$$



Slika 3.9: Definicija sagite S.

U mionskom spektrometru točke A, B i D odgovaraju položaju mionskog traga izmjerenom u unutrašnjem, vanjskom, odnosno srednjem sloju mionskih komora. Ako je polumjer zakrivljenosti mionske putanje velik, relacija 3.3 može se aproksimirati izrazom

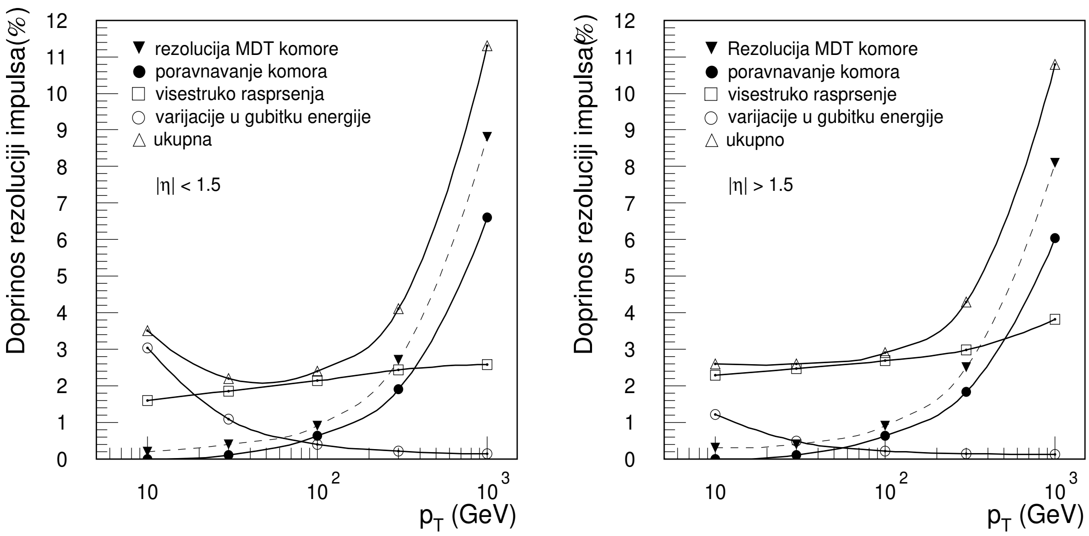
$$S = \frac{l^2}{8\rho} \tag{3.4}$$

Mjerenjem sagite dobiva se informacija o impulsu p miona, p=eBρ (e-elementarni naboj, B-gustoća magnetskog toka). Preciznost mjerenja sagite usko je povezana s preciznošću mjerenja impulsa:

$$|\frac{dS}{S}| = |\frac{dp}{p}| = \frac{8p}{eBl^2}dS \tag{3.5}$$

Iz uvjeta na preciznost mjerenja impulsa od ~10% u području p_T=1 TeV slijedi da preciznost mjerenja sagite mora biti bolja od 50 μm u cilindričnom, te bolja od 30 μm u end-cap području. Položaj samih komora nije moguće održavati stabilnim na ovoj razini preciznosti tijekom rada detektora. Naime, jaka magnetska polja i temperaturni gradijenti uzrokovat će znatno veće pomake komora, reda veličine i do 1 mm. Umjesto mehaničkog poravnavanja komora upotrijebit će se optički sustavi za nadgledanje položaja komora. Izmjereni pomaci od nominalnog položaja služe za *"off-line"* korekcije mjerene sagite.

Slika 3.10 prikazuje doprinose različitih faktora (uključujući i poravnavanje komora) na preciznost mjerenja impulsa u cilindričnom, te u end-cap području. Efikasnost optičkog nadziranja vrlo je bitna u području velikih impulsa.



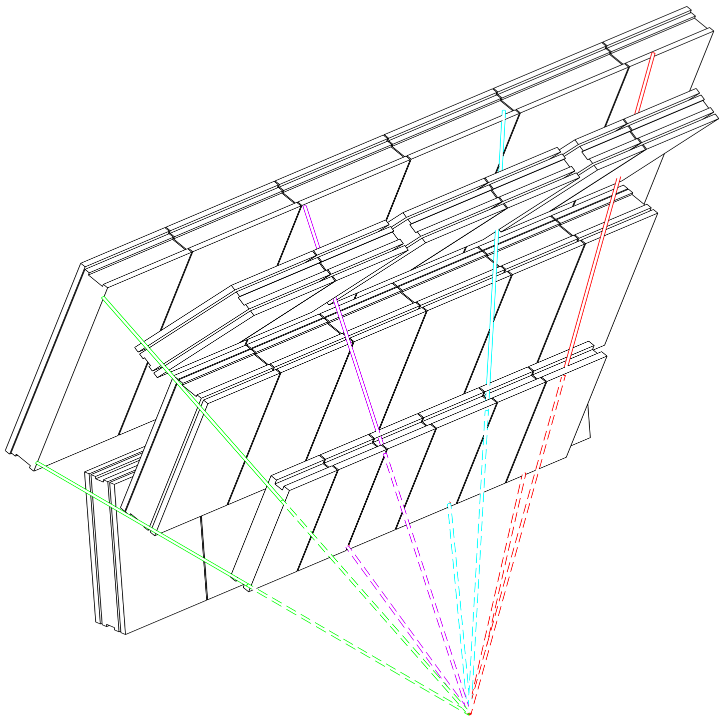
Slika 3.10: Doprinosi raznih utjecaja na preciznost mjerenja mionskog impulsa u cilindričnom ($|\eta|$ <1.5) i end-cap području ($|\eta|$ >1.5) mionskog spektrometra.

3.4.3 Optički sustav za nadzor položaja u detektoru

Sustav za nadzor položaja komora temelji se na upotrebi optičkih senzora poredanih duž određene optičke osi. Senzori moraju biti vrlo precizno instalirani na komore i ostale vezne mehaničke elemente (tipična preciznost montiranja iznosi oko 20 μm). Shematika samog sustava u cilindričnom dijelu detektora razlikuje se od one u end-cap području.

Cilindrični dio mionskog spektrometra

Slika 3.11 daje trodimenzionalni prikaz dvaju tipičnih projekcijskih tornjeva u cilindričnom području. Za svaki toranj naznačene su po četiri projekcijske osi duž kojih se instaliraju optički senzori za dvodimenzionalno mjerenje pomaka.



Slika 3.11: Trodimenzionalni prikaz rasporeda projekcijskih osi u sustavu za nadzor položaja komora u cilindričnom dijelu mionskog spektrometra.

Četiri projekcijske osi (*i=1,2,3,4*) precizno mjere iznos *prividne* sagite u longitudinalnom (s_i^L) i transverzalnom smjeru (s_i^T), nastale pomakom komora iz nominalnog položaja. Na temelju tih mjerenja vrši se *korekcija sagite* mionske putanje. U linearnom modelu korekcija sagite s^{corr} za mion beskonačnog impulsa dana je linearnom kombinacijom prividnih sagita:

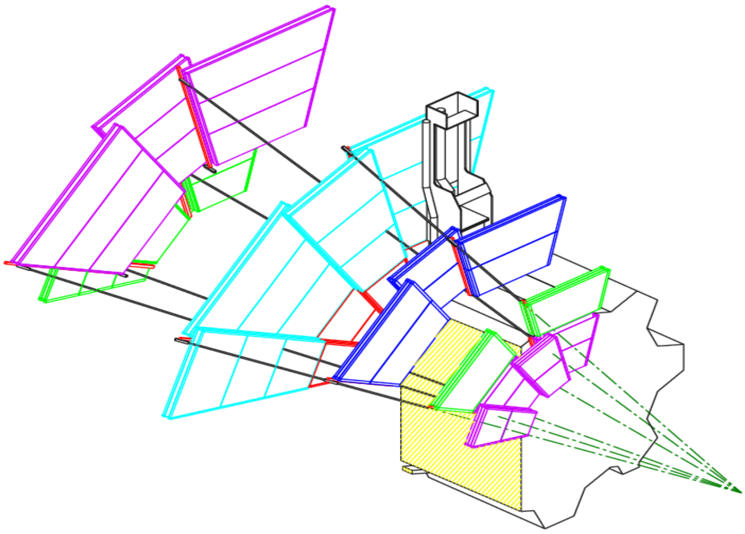
$$s^{corr}(\vec{r}) = \Sigma_{i=1,4}\left[a_i^L(\vec{r})\cdot s_i^L + a_i^T(\vec{r})\cdot s_i^T\right]. \tag{3.6}$$

Pritom linearni koeficijenti $a_i^{T,L}$ ovise jedino o geometriji projekcijskog tornja, te o položaju $\vec{r}$ mionske putanje unutar tornja. (U idealnom slučaju kad nema pomaka iz nominalnih položaja, korekcija je $s^{corr} = 0$.)

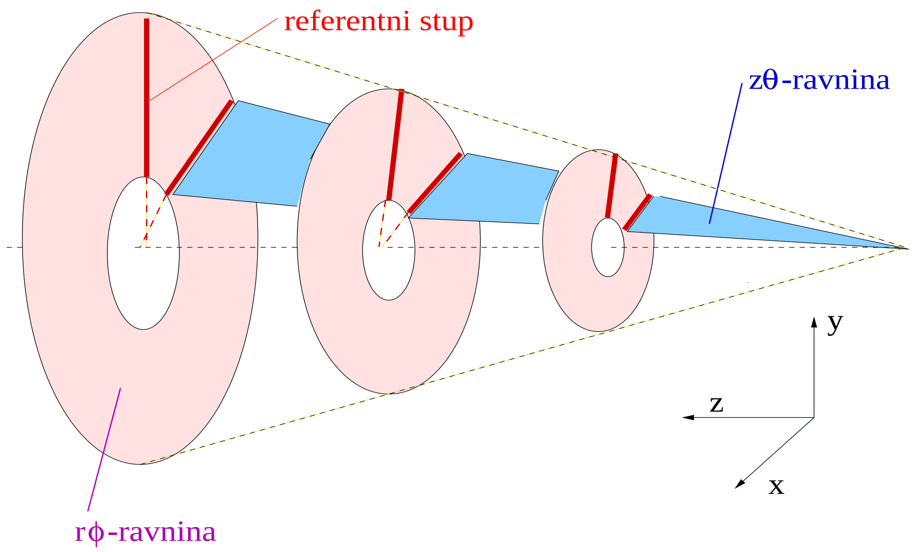
Preciznost mjerenja korekcije sagite (s^{corr}) ovisi o preciznosti samih optičkih senzora, preciznosti njihovog montiranja na komore, točnosti početne instalacije komora, aperturi projekcijskog tornja, odstupanjima od idealne projekcijske geometrije, te preciznosti u mjerenju x-koordinate mionske putanje.

End-cap područje mionskog spektrometra

Prethodno opisani koncept projekcijskih tornjeva ne može se upotrijebiti u end-cap području jer toroidalna zavojnica zaklanja putanje mnogih projekcijskih osi. Stoga je potrebno ostvariti sustav sa što manje projekcijskih putanja i potpunom rekonstrukcijom relativnih položaja komora.



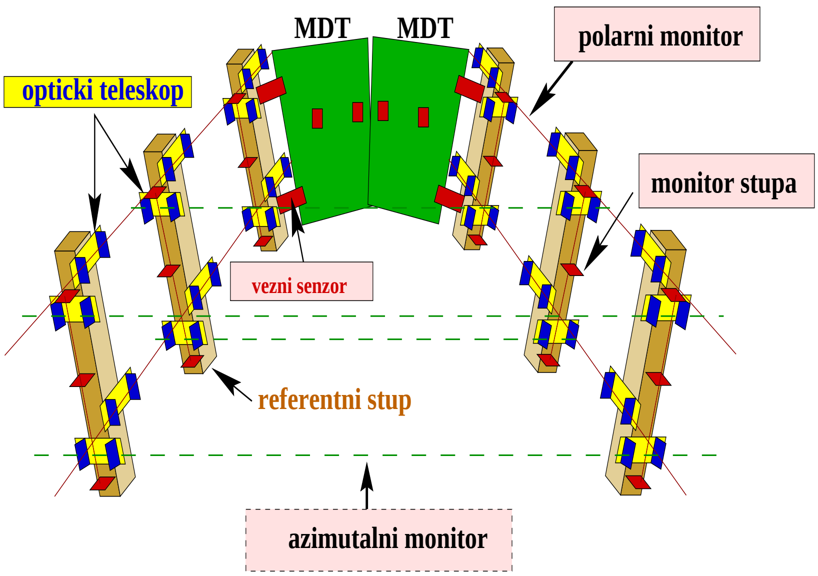
Slika 3.12: Trodimenzionalni prikaz rasporeda projekcijskih osi u jednom oktantu sustava za nadzor položaja komora u end-cap dijelu mionskog spektrometra. Dva susjedna sustava referentnih stupova naznačena su crvenom bojom. Polarne osi koje povezuju stupove u danom azimutalnom kutu naznačene su crnom bojom.



Slika 3.13: Trodimenzionalni prikaz geometrijskog rasporeda stupova referentne rešetke u jednom oktantu sustava za nadzor položaja komora u end-cap dijelu mionskog spektrometra. Referentni stupovi naznačeni su crvenom bojom. $z\theta$ i $r\phi$ ravnine označene su osjenčano.

Osnovni elementi ovog sustava su ([24], [25]):
• referentni potporni stupovi izrađeni od mehanički i termalno stabilnog materijala koji tvore *referentnu rešetku sustava*, te
• *optički senzori* za nadzor položaja koji služe za međusobno poravnavanje referentnih stupova, te povezivanje MDT-komora s referentnom rešetkom.

Slike 3.12 i 3.13 daju trodimenzionalni prikaz projekcijskih osi u jednom oktantu end-cap detektora. Temeljna shema referentne rešetke s MDT-komorama prikazana je na slici 3.14 (prikazan je jedan oktant). Čitav sustav može se podijeliti na četiri podsustava.



Slika 3.14: Shema jednog oktanta referentne rešetke sustava za nadzor položaja komora u end-cap području mionskog spektrometra. Referentni stupovi povezani su polarnim (puna linija) i azimutalnim osima (isprekidana linija).

i) Polarni monitori

Ovaj podsustav čine referentni stupovi raspoređeni radijalno, po jedan u svakom sloju MDT-komora (EI, EM, i EO). Stupovi su u $z\theta$-ravninama (vidi sliku 3.13) povezani polarnim monitorima koji nadziru relativne pomake stupova. Polarni monitor sastoji se od tri tzv. *optička teleskopa*. Optički teleskop čine dva optička senzora položaja, precizno montirana na odgovarajuću platformu.

ii) Azimutalni monitori

Ovaj podsustav (na sličan način kao i polarni monitori) nadzire relativne pomake referentne rešetke u $r\phi$-ravninama (slika 3.13).

iii) Monitori referentnih stupova

U end-cap području mionskog spektrometra mora postojati mogućnost da se toroidalne zavojnice (privremeno) maknu van, pa je stoga nužno presječi referentne stupove na dva dijela. Ovaj podsustav motri relativne pomake dvaju dijelova jednog stupa.

iv) Vezni monitori

Vezni senzori povezuju referentnu rešetku sa samim mionskim komorama.

Efikasnost opisanog sustava u mjerenju korekcije sagite simulirana je za čitavo end-cap područje mionskog spektrometra [25]. Faktori koji utječu na tu efikasnost su:

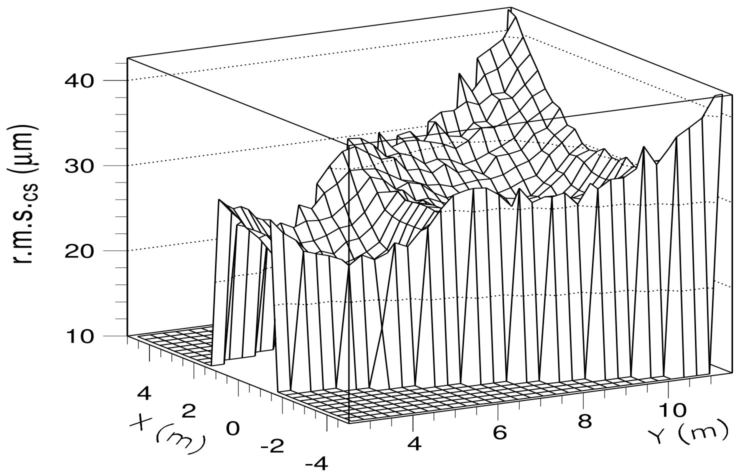
• pomaci i rotacije komora i stupova u odnosu na nominalne položaje
• preciznost komore u mjerenju mionskih tragova
• intrinsična rezolucija optičkih senzora, $\sigma_{x,y}$
• preciznost instalacije optičkih senzora na referentne stupove ($\sigma_{x,y}^{stup}$) i MDT-komore ($\sigma_{x,y}^{MDT}$)
• neodređenost σ_θ u kutu otklona (tj. smjeru) snopa svjetlosti koji prolazi kroz optičke senzore

U tablici 3.2 navedeni su zahtjevi koje moraju ispuniti optički senzori da bi se postigla željena preciznost mjerenja korekcije sagite (tj. r.m.s$_{cs}$ <30 μm).

$\sigma_{x,y}$	σ_θ	σ_x^{stup}	σ_y^{stup}	σ_z^{stup}
2 μm	5 μrad	100 μm	15 μm	20 μm

Tablica 3.2: Zahtjevi na intrinsičnu preciznost, te preciznost instalacije optičkih senzora.

Slika 3.15 prikazuje ovisnost preciznosti korekcije sagite (r.m.s$_{cs}$) o položaju mionske putanje u EM-sloju MDT-komora, uz uvjet da su ostvareni zahtjevi navedeni u prethodnoj tablici.



Slika 3.15: Preciznost mjerenja korekcije sagite (r.m.s$_{cs}$) u ovisnosti o koordinatama (x,y) mionske putanje u EM sloju MDT-komora. Pretpostavljeni su parametri navedeni u Tablici 3.2.

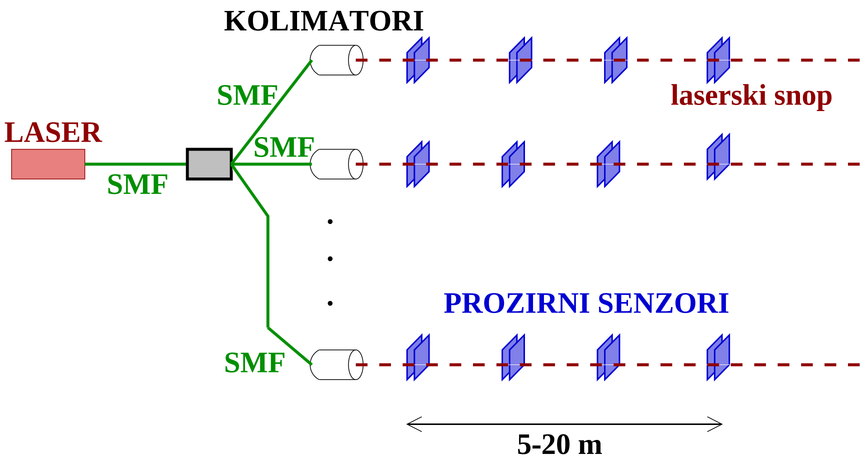
Postoji nekoliko vrsta optičkih senzora koji su kandidati za primjenu u opisanoj shemi sustava za nadzor položaja. Sljedeća poglavlja ovog rada koncentrirana su na jednog od kandidata za ostvarenje polarnog podsustava.

4

Laserski sustav ALMY

4.1 Opis rada sustava ALMY

Laserski sustav ALMY [26] (**AL**ignierung des **MY**onspektrometers, slika 4.1) razvijen je na Max-Planck-Institutu za fiziku u Münchenu. Razvoj je u međuvremenu napredovao ([27], [28]) pa se sada razmatra i njegova upotreba u mionskim spektrometrima detektora ALICE [15] i CMS [13]. Trenutno se upotrebljava u eksperimentu HERA-B [29], a ispituje se mogućnost primjene u eksperimentima LHC-B [14], ZEUS, te u linearnom sudarivaču TESLA [30].



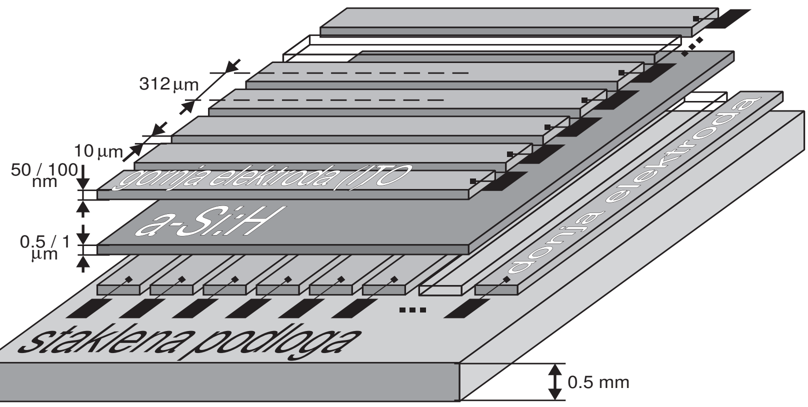
Slika 4.1: Laserski sustav ALMY za precizno određivanje položaja detektora tragova čestica.

Sustav čine laserske diode na koje se spajaju optička vlakna za prijenos jednog moda laserske svjetlosti (**S**ingle **M**ode **F**iber, SMF). Profil kolimiranog laserskog snopa opisan je Gaussovom funkcijom. Snop prolazi kroz određeni broj poluprozirnih silicijskih strip-senzora (senzori ALMY), koji vrlo precizno mjere njegov položaj (dvodimenzionalno mjerenje).

Senzori se postavljaju jedan iza drugog duž osi u kojoj treba promatrati položaj komponenti detektora. Duž te osi prolazi laserski snop. Svaka promjena u mjerenom položaju snopa ekvivalentna je pomaku komponente detektora (na koju je senzor montiran) iz nominalnog položaja.

4.2 Silicijski strip senzori ALMY

Aktivno područje senzora ALMY (vidi sliku 4.2) čini sloj hidrogeniziranog amorfnog silicija (a-Si:H) debljine 0.2 do 1.0 μm, koji je smješten između dva sloja elektroda debljine $\sim$100 μm. Elektrode su izrađene od prozirnog materijala, indij-cink-oksida (ITO) i segmentirane su u dva međusobno ortogonalna sloja. Pokrivaju aktivno područje od 20x20 mm^2.



Slika 4.2: Struktura senzora ALMY.

Oba sloja sadrže 64 elektrode, i tako tvore rešetku od 64x64 Schottky-diode. Sve to nanosi se na staklenu podlogu debljine 0.5-1 mm. Na donjoj strani podloge nalazi se dodatni protu-reflektivni sloj.

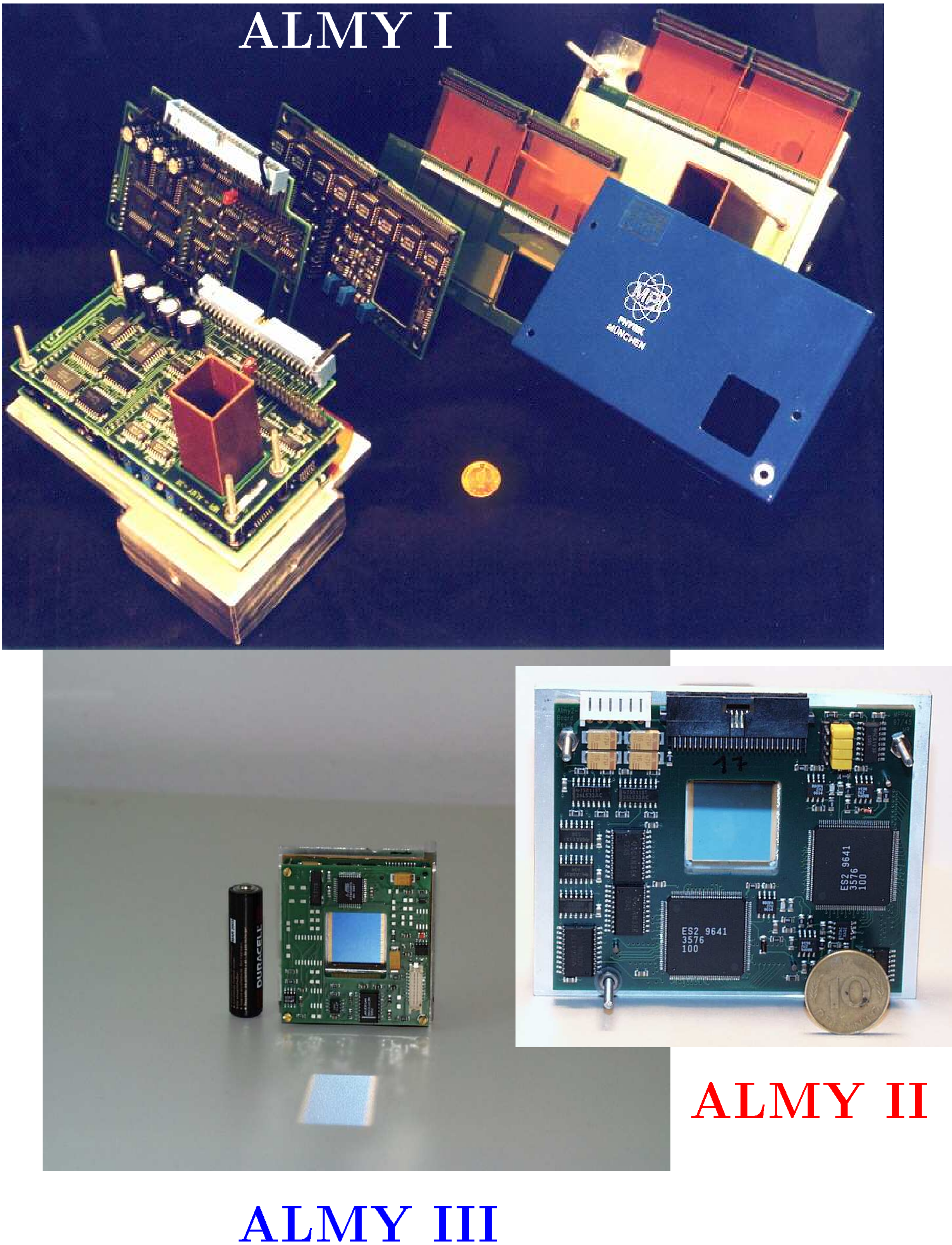
Na opisani prozirni dio senzora spojen je elektronički sklop za očitavanje podataka. Svaka dioda mjeri intenzitet upadne laserske svjetlosti. Prilagodba Gaussove funkcije na distribuciju intenziteta definira dvodimenzionalne koordinate položaja laserskog snopa na površini senzora.

Dizajn elektroničkog sklopa, kao i kvaliteta samog prozirnog dijela, mijenjali su se (i poboljšavali) tijekom vremena. Slika 4.3 prikazuje tri generacije senzora ALMY.

Rezultati ispitivanja senzora prve generacije (*ALMY I*) detaljnije su opisani u [31]. Ovaj se rad prvenstveno bavi ispitivanjem druge generacije senzora (*ALMY II*). Upravo je u tijeku izrada treće generacije (*ALMY III*), ali dosad postoji tek nekoliko preliminarnih rezultata njihovog ispitivanja. Vanjske dimenzije senzora smanjuju se sa svakom novom generacijom.

Osnovna razlika između prve dvije generacije je protu-reflektivni sloj na stražnjoj strani staklene podloge. Taj dodatni sloj rješava bitne probleme prve generacije senzora - smanjuje koeficijent refleksije laserske svjetlosti za faktor 10 i time uklanja efekte interferencije, kao što će biti opisano u sljedećem poglavlju. Elektronički sklop je također poboljšan u odnosu na prvu generaciju - osim manjih dimenzija, njegova je prednost i veća osjetljivost na upadnu svjetlost (bolja pojačala).

Treća generacija također će biti dodatno poboljšana, što će biti spomenuto u završnom dijelu ovog rada.



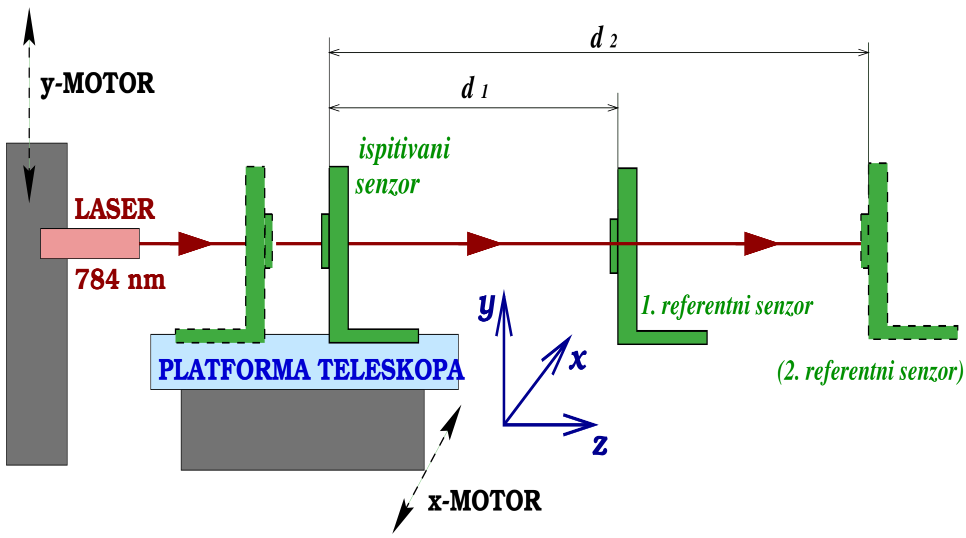
Slika 4.3: Senzori ALMY s integriranim elektroničkim sklopom; prva generacija senzora prikazana je na vrhu, druga dolje desno, a treća dolje lijevo.

5

Nedostaci senzora ALMY I

5.1 Eksperimentalna postava za ispitivanje senzora ALMY

Shema tipičnog sustava za ispitivanje preciznosti i optičkih svojstava senzora prikazana je na slici 5.1. Postavu čine dva motora koji se pomiču u x-, odnosno y-smjeru, u koracima od 312.5 μm (s preciznošću od 1 μm). Na motor koji se pomiče vertikalno (y-motor) instaliran je GaAlAs laser valne duljine 784 nm. Laserski snop prolazi kroz ispitivani senzor, te kroz jedan ili dva referentna senzora iza njega. Ispitivani senzor montiran je na motor koji se pomiče horizontalno (x-motor). (Na slici 5.1 naznačene su dvije moguće orijentacije ispitivanog senzora u odnosu na laserski snop.)



Slika 5.1: Eksperimentalna postava sustava za ispitivanje svojstava senzora ALMY.

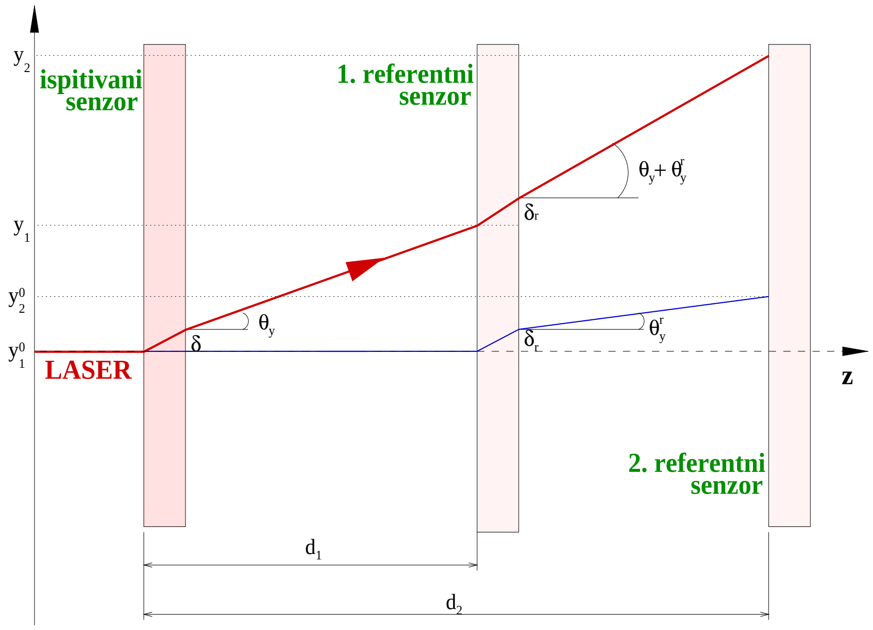
Svojstva senzora određuju se tzv. *površinskim ispitivanjem*. Oba motora pomiču se u pravilnim koracima tako da se položaj laserskog snopa na površini senzora pomiče opisujući kvadratnu mrežu (čvorovi mreže razmaknuti su 312.5 μm, a mreža pokriva cijelo aktivno područje senzora od 20x20 mm^2). Rezultati ispitivanja govore o globalnim značajkama senzora:

1. Moć razlučivanja položaja laserskog snopa

U svakom od čvorova stvarni položaj laserskog snopa (x_s, y_s) na površini senzora definiran je položajem motora (tj. s preciznošću od 1 μm). Položaj snopa (x_{mj}, y_{mj}) određuje se na temelju mjerene raspodjele struje prikupljene elektrodama senzora ALMY. Za danu točku na površini senzora na taj se način određuje odstupanje mjerenog od stvarnog položaja laserskog snopa, za x-smjer ($\Delta x = x_s - x_{mj}$), i za y-smjer ($\Delta y = y_s - y_{mj}$). Postupak se ponavlja za čitavu kvadratnu mrežu, što rezultira površinskom raspodjelom veličina Δx i Δy. Standardne devijacije (σ_x i σ_y) tih površinskih raspodjela definiraju *moć razlučivanja položaja*.

2. Otklon laserskog snopa prolazom kroz senzor

Referentni senzor(i) služe za mjerenje kuta otklona laserskog snopa (θ_x,θ_y) nakon prolaza kroz ispitivani senzor (vidi sliku 5.2).



Slika 5.2: Pomak laserskog snopa pri prolazu kroz ispitivani senzor (crvena linija). Plavom linijom naznačen je smjer snopa u odsutnosti ispitivanog senzora.

Referentni senzori mjere položaj laserskog snopa za slučajeve kad ispitivani senzor nije u putanji snopa ($y^0_{1(2)}$, vidi sliku), te kad snop prolazi i kroz ispitivani senzor ($y_{1(2)}$). Time su definirane razlike koordinata (tj. pomak laserskog snopa) Δ_1 i Δ_2.

$$\Delta_{1y} = y_1 - y_1^0 = \delta + \theta \cdot d_1 \tag{5.1}$$

$$\Delta_{2y} = y_2 - y_2^0 = \delta + \theta \cdot (d_2 - d_1) = \delta + \theta \cdot d_2 \tag{5.2}$$

Pritom je $d_{1(2)}$ udaljenost od ispitivanog do prvog (drugog) referentnog senzora.

Kut otklona θ_y (analogni izrazi vrijede i za θ_x) može se izraziti relacijom 5.3:

$$\theta_y = \frac{\Delta_{2y} - \Delta_{1y}}{d_2 - d_1}, \tag{5.3}$$

Upotreba dvaju referentnih senzora, umjesto samo jednog, omogućuje razlikovanje dviju vrsta pomaka laserskog snopa (tj. mjerenje stvarnog kuta otklona $\theta_{x,y}$). Mjerenje pomaka koji nastaje zbog prolaza kroz planparalelni senzor (*translacija*, δ) ne ovisi o udaljenosti od ispitivanog do referentnog senzora. Ako plohe senzora nisu savršeno paralelne, mjeri se dodatni pomak (*otklon*, $\theta \cdot d$) koji je proporcionalan s udaljenošću d od ispitivanog do referentnog senzora.

Pomak koji nastaje uslijed prolaza laserskog snopa kroz prvi referentni senzor ($\delta_r + \theta_r \cdot (d_2 - d_1)$) ne utječe na mjerenje kuta otklona θ jer je prisutan bez obzira nalazi li se ispitivani senzor izvan ili unutar putanje laserskog snopa (tj. doprinos ovog pomaka se poništava).

Globalni kut otkolna ($\bar{\theta}_{x,y}$) za dani senzor definiran je kao srednja vrijednost površinske raspodjele izmjerenih kuteva ($\theta_{x,y}$). Standardna devijacija ove raspodjele ($\sigma_{\theta x,y}$) definira *neodređenost kuta otklona laserskog snopa*.

3. Osjetljivost senzora na fotonsku pobudu

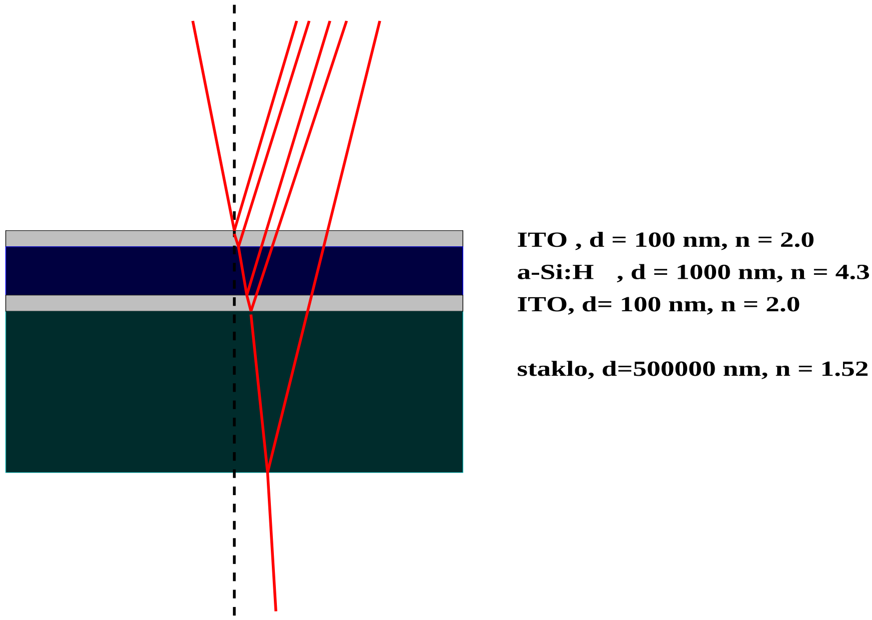
Intenzitet struje mjerene elektrodama senzora (izražen u ADC jedinicama) ovisi o osjetljivosti samog senzora na lasersku pobudu. Intenzitet laserskog snopa ograničen je saturacijskom vrijednošću od 1024 ADC jedinice, pri čemu šum koji dolazi od samog električnog snopa iznosi tek nekoliko ADC jedinica.

4. Transmitivnost

Referentnim senzorima moguće je usporediti intenzitet laserskog snopa prije i poslije umetanja ispitivanog senzora u putanju snopa. Omjer tih dviju vrijednosti definira propusnost senzorskog materijala, tj. *transmitivnost laserskog snopa*, τ.

5.2 Rezultati ispitivanja prve generacije senzora (ALMY I)

Temeljni nedostatak senzora ALMY I jest pojava interferencije upadne laserske svjetlosti sa dijelom snopa koji se reflektira na različitim slojevima unutar senzora (vidi sliku 5.3).



Slika 5.3: Djelomična refleksija unatrag laserskog snopa na raznim slojevima senzora.

Staklena podloga daje najveći doprinos opaženim efektima interferencije. Plohe te podloge nisu savršeno paralelne, već međusobno zatvaraju određeni *kut klina*. Razlika faza dvaju interferirajućih snopova stoga će varirati ovisno o položaju na površini senzora. Uslijed toga javlja se nejednolikost u preciznosti mjerenja položaja laserskog snopa. Ispitivanje ovih efekata detaljnije je razrađeno u [31]. Uslijed efekata interferencije, temeljna svojstva senzora nisu zadovoljavajuća.

Slika 5.4 prikazuje tipične rezultate površinskog ispitivanja senzora prve generacije. Opaža se znatna nejednolikost svake od prikazanih površinskih raspodjela, što je posljedica spomenutih efekata interferencije.

Ispitane su globalne značajke 25 senzora ALMY I, te su dobiveni sljedeći rezultati:

1. Moć razlučivanja ($\sigma_{x,y}$) iznosi približno 5 μm, što je na samoj granici postavljenih zahtjeva.

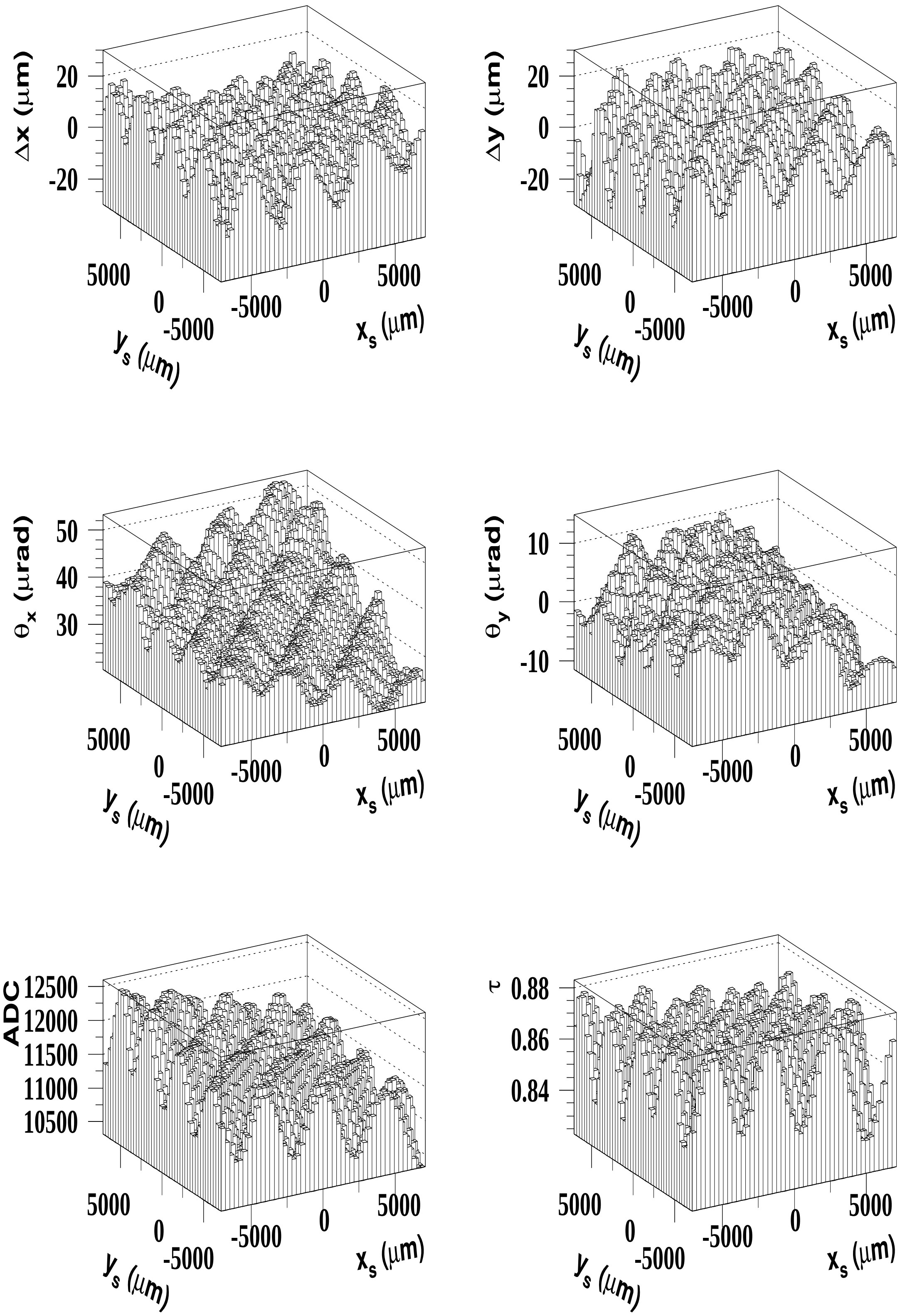
2. Globalni kut otklona laserskog snopa ($\bar{\theta}_{x,y}$) varira od jednog do drugog senzora, jer je kut klina staklene podloge različit za različite senzore. Opaženi su kutovi otklona i do 100 μrad. Nejednolikost površinske raspodjele ograničava preciznost mjerenja kuta otklona laserskog snopa na $\sigma_{\theta x,y}$=7 μrad.

S druge strane, u sustavu za nadzor položaja komponenti detektora zahtijeva se da smjer laserskog snopa bude poznat s preciznošću boljom od $\sigma_{\theta x,y}^{nominalno}$=5 μrad. Budući da je stvarni kut otklona znatno veći, potrebno je za svaki senzor odrediti kut otklona kao funkciju $\theta_{x,y}(\mathrm{x}_s,\ \mathrm{y}_s)$ položaja upadnog laserskog snopa na površinu senzora, tj. potrebno je *baždariti senzor.*

No, zbog efekata interferencije izmjereni će otklon varirati čak i s neznatnim promjenama temperature, te valne duljine ili snage laserskog snopa. Stoga ne postoje stabilni baždarni parametri za opis kuta otklona, te takvi senzori ne zadovoljavaju nominalne uvjete.

3. Također, zbog velikog koeficijenta refleksije laserske svjetlosti (~20%) transmitivnost je relativno mala (~75%). Time je broj senzora koje je, bez gubitaka u moći razlučivanja, moguće postaviti u putanju jednog laserskog snopa ograničen na ~8.

Navedeni rezultati ispitivanja prve generacije senzora upozoravaju na potrebu za daljnjim poboljšanjima kako bi se ostvarili postavljeni zahtjevi sustava za nadzor položaja. Sljedeća poglavlja pokazat će da je taj cilj ostvaren u drugoj generaciji senzora (ALMY II).



Slika 5.4: Rezultati površinskog ispitivanja senzora ALMY I. (xs, y$_s$) su stvarne koordinate položaja laserskog snopa; (Δx, Δy) je odstupanje od stvarnog položaja; (θ_x, θ_y) je kut otklona laserskog snopa prolazom kroz senzor; ADC označava osjetljivost na lasersku pobudu, a τ je transmitivnost senzorskog materijala.

6

Svojstva senzora ALMY II

6.1 Globalne značajke senzora ALMY II

6.1.1 Moć razlučivanja položaja laserskog snopa

Slika 6.1 prikazuje tipične rezultate površinskog ispitivanja moći razlučivanja položaja za jedan od senzora druge generacije.

Na slici 6.1(a) opaža se znatna varijacija veličina Δx i Δy u ovisnosti o položaju (x_s, y_s) na površini senzora (od -20 do 20 μm). Ovaj rezultat nije posljedica stvarne nepreciznosti samog senzora, već se javlja jer je xy-koordinatni sustav senzora rotiran (pod određenim kutom α od nekoliko miliradijana) u odnosu na koordinatni sustav motora. Slika 6.1(b) prikazuje iste površinske raspodjele nakon korekcija za spomenuti kut rotacije. Kao što je vidljivo na slici, preciznost senzora vrlo je jednolika duž cijele površine.

Slika 6.1(c) daje jednodimenzionalnu projekciju površinskih raspodjela iz (b). Srednje vrijednosti ("Mean") veličina Δx i Δy su vrlo bliske nuli ($\bar{\Delta x} \approx 0$, $\bar{\Delta y} \approx 0$), što znači da se senzorom vrlo precizno mjeri položaj snopa. Moć razlučivanja u x i y smjeru (σ_x=1.3 μm i σ_y=1.6 μm) znatno je bolja od postavljenih nominalnih zahtjeva ($\sigma_{x,y}^{nom}$ <2 μm).

6.1.2 Kut otklona laserskog snopa

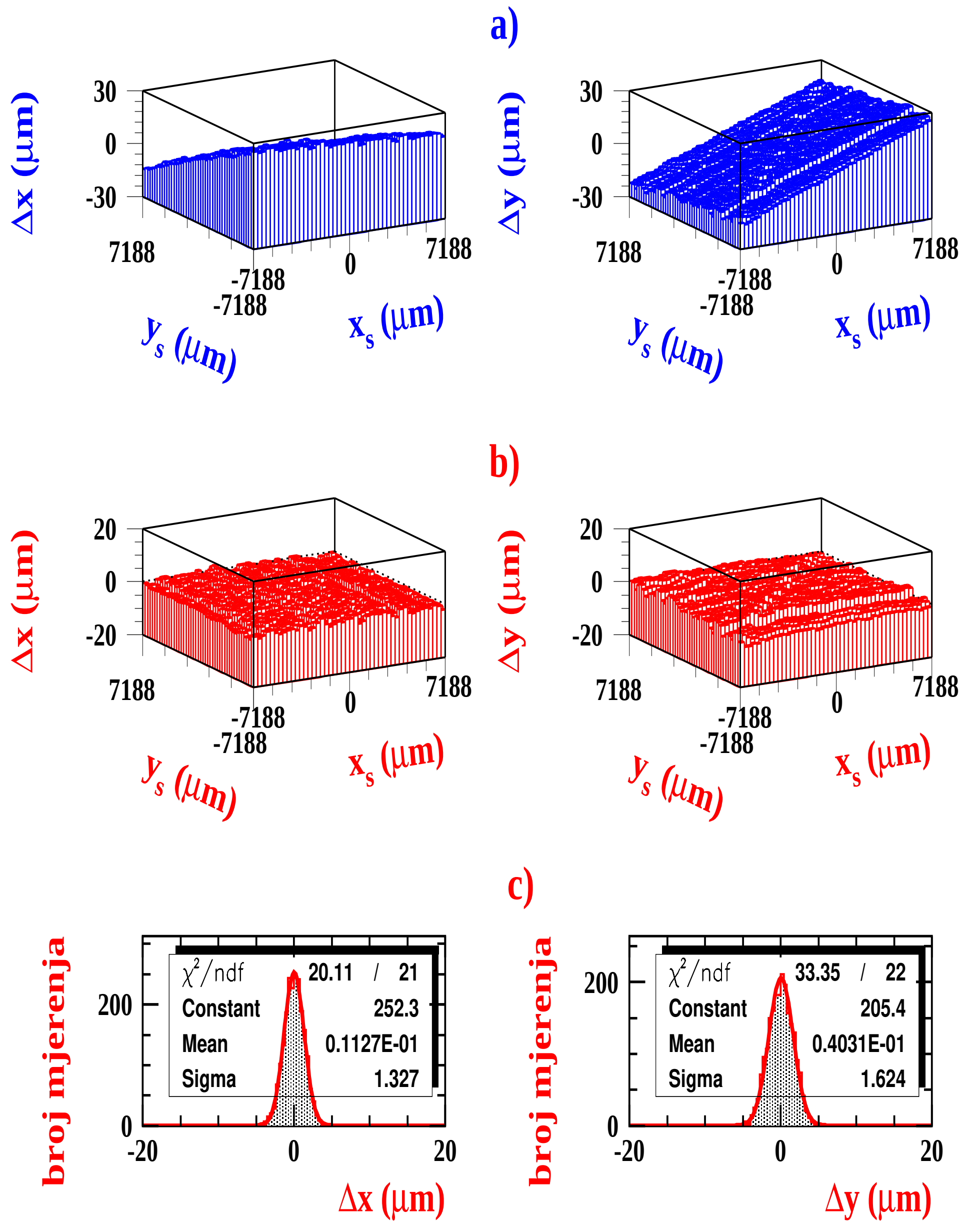
Slika 6.2 prikazuje tipične rezultate površinskih raspodjela kuta otklona laserskog snopa pri prolazu kroz jedan senzor tipa ALMY II (a), te jednodimenzionalne projekcije tih raspodjela (b).

Glavni doprinos otklonu nastaje zbog kuta klina (ϵ) staklene podloge. Srednja vrijednost mjerenog kuta ($\bar{\theta}_{x,y}$) određena je relacijom

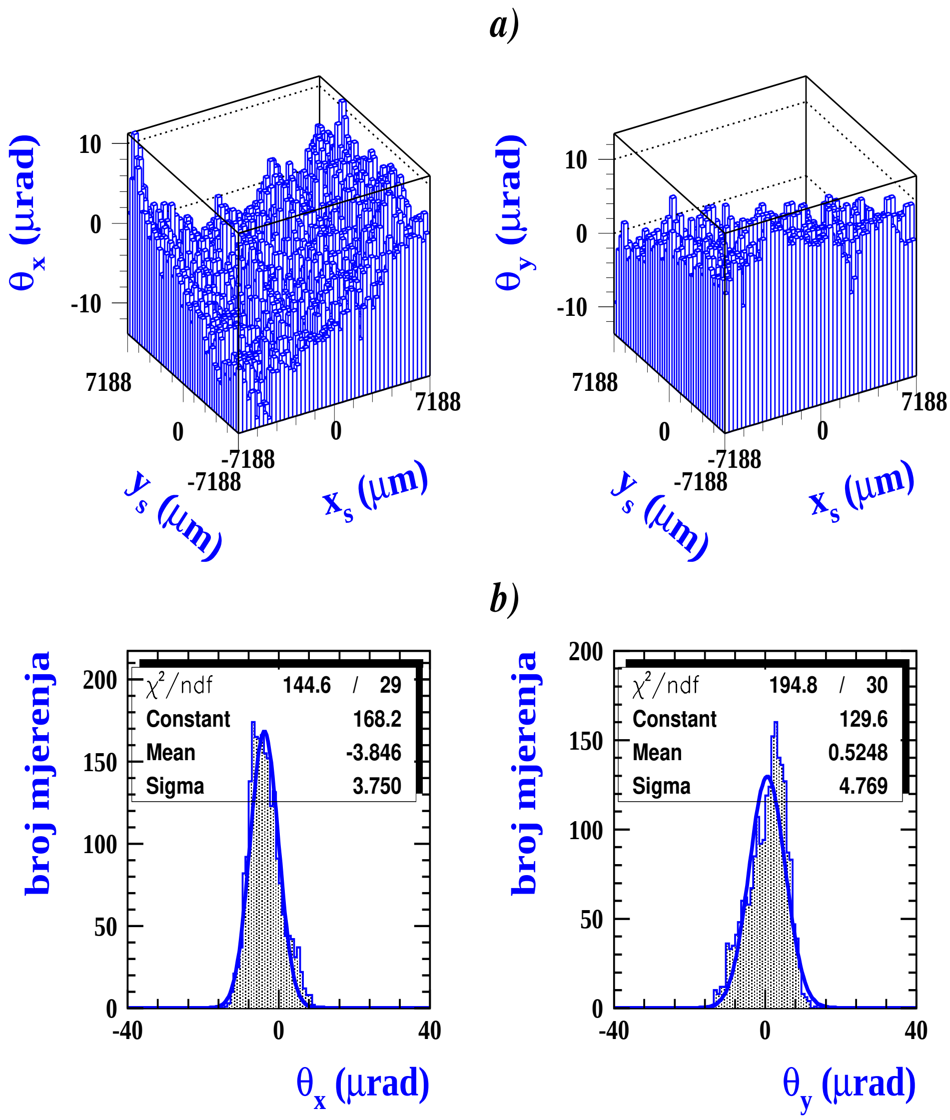
$$\bar{\theta}_{x,y} \approx (n-1) \cdot \epsilon, \tag{6.1}$$

gdje je n indeks loma svjetlosti za staklo. Standardne devijacije jednodimenzionalnih projekcija ("Sigma") predstavljaju neodređenost u mjerenju kuta otklona ($\sigma_{\theta x,y}$).

Za dani senzor prosječni je kut otklona $\bar{\theta}_x$=-3.8 μrad i $\bar{\theta}_y$=0.5 μrad, izmjeren s preciznošću $\sigma_{\theta x}$=3.8 μrad, odnosno $\sigma_{\theta y}$=4.8 μrad.



Slika 6.1: Rezultati površinskog ispitivanja senzora ALMY II. Prikazane su (a) površinske raspodjele veličina Δx i Δy (kut rotacije između koordinatnih sustava senzora i motora nije uzet u obzir), (b) površinske raspodjele veličina Δx i Δy, korigirane za kut rotacije između koordinatnih sustava senzora i motora, (c) jednodimenzionalne projekcije raspodjela iz (b).



Slika 6.2: Rezultati površinskog ispitivanja senzora ALMY II. (a) površinske raspodjele kuta otklona snopa, θ_x i θ_y; (b) jednodimenzionalne projekcije raspodjela iz (a).

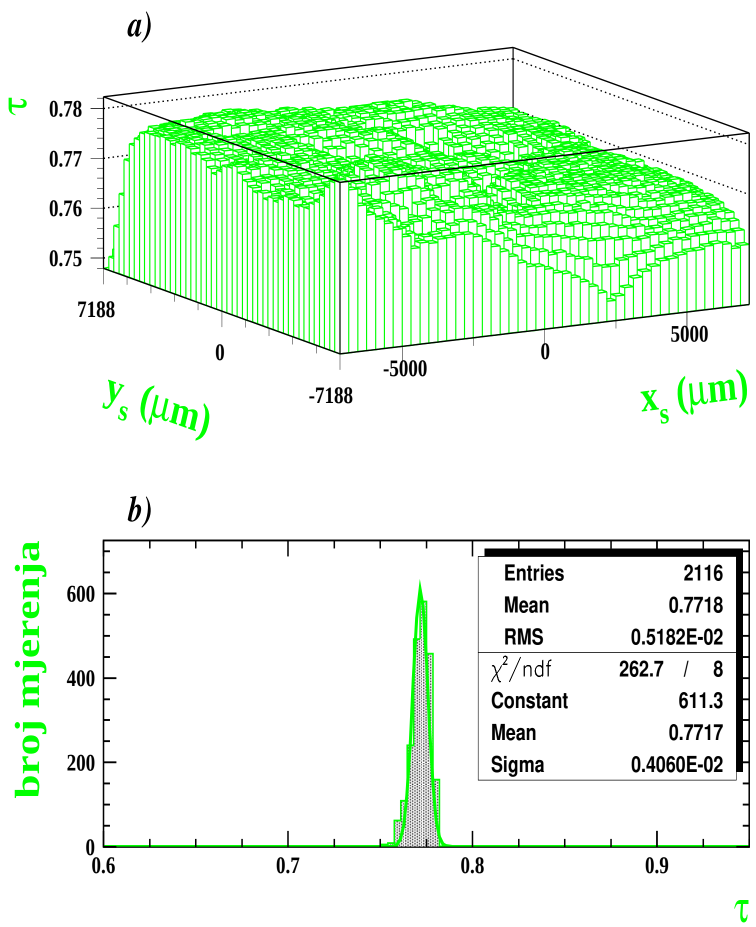
6.1.3 Transmitivnost laserske svjetlosti

Transmitivnost laserskog snopa kroz ispitivani senzor dana je izrazom

$$\tau = \frac{I}{I_0}, \tag{6.2}$$

gdje je I_0 početni intenzitet laserskog snopa (mjeren referentnim senzorom), a I je intenzitet tog snopa nakon prolaza kroz ispitivani senzor. Slika 6.3 prikazuje površinsku raspodjelu transmitivnosti za jedan od senzora (a), te jednodimenzionalnu projekciju te raspodjele (b).

Srednja transmitivnost ("Mean") ovog senzora slična je prosječnoj transmitivnosti senzora ALMY I. Za razliku od prve generacije senzora, ovdje se opaža vrlo jednolika raspodjela transmitivnosti na površini senzora (jer nema utjecaja interferentnih pojava).



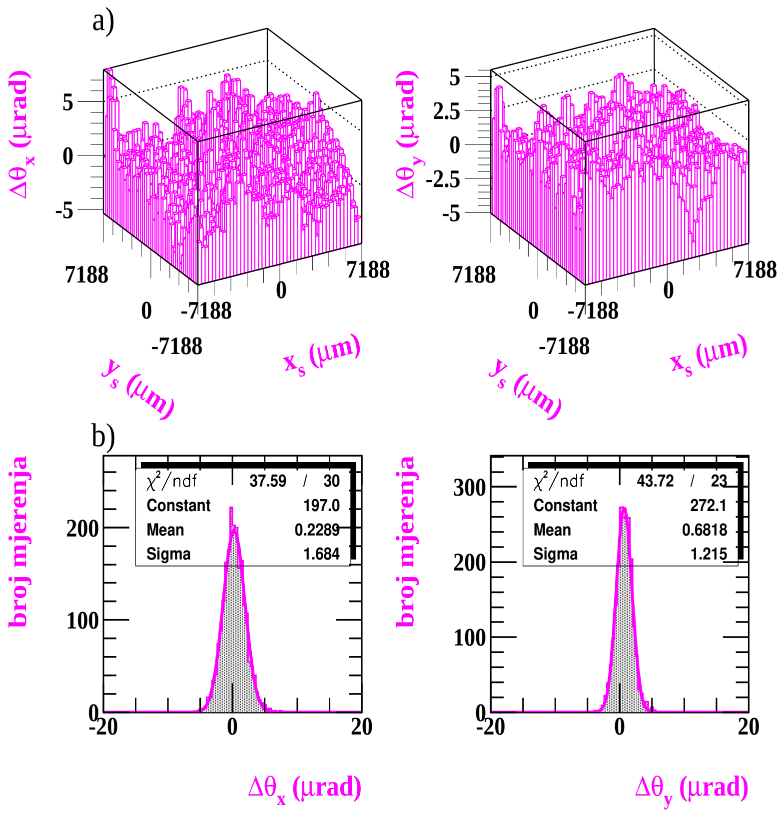
Slika 6.3: Rezultati površinskog ispitivanja senzora ALMY II. (a) površinska raspodjela transmitivnosti τ; (b) jednodimenzionalna projekcija raspodjele iz (a).

6.2 Reproducibilnost površinskih ispitivanja senzora

Prije serijskog testiranja svih senzora treba ispitati reproducibilnost opisanog postupka površinskog ispitivanja. U tu svrhu je površinsko ispitivanje jednog od senzora (senzor ns028) ponovljeno pet puta u ekvivalentnim uvjetima (tj. bez ikakvih promjena u postavi za testiranje).

Dva referentna senzora instalirana su na udaljenostima d_1=0.24 m i d_2=1.95 m od ispitivanog senzora.

Površinska raspodjela kuta otklona dobivena prvim ispitivanjem ($\theta_{1x,y}$) uspoređuje se s prosječnom raspodjelom iz ostala četiri ispitivanja ($< \theta_{x,y} >$). Slika 6.4 prikazuje razliku ovih raspodjela, $\Delta\theta_{x,y}$=$\theta_{1x,y}$-$< \theta_{x,y} >$.



Slika 6.4: Reproducibilnost površinskih ispitivanja senzora. (a) raspodjela odstupanja $\Delta\theta_{x,y}$ od prosječne površinske raspodjele; (b) projekcija raspodjele iz (a).

Razlika između pojedinih mjerenja je približno jednaka nuli, i to s preciznošću boljom od 2 μrad . (To je intrinsična statistička pogreška pojedinog površinskog ispitivanja.) Time je demonstrirana reproducibilnost postupka.

6.3 Rezultati serijskih ispitivanja senzora

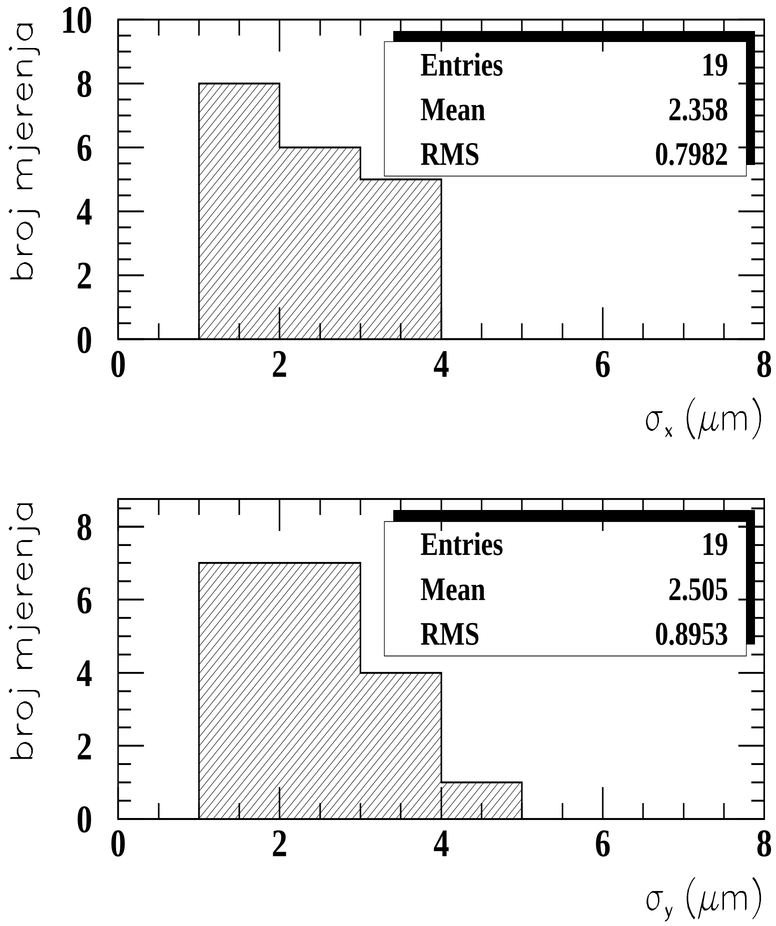
Tablica 6.1 prikazuje rezultate testiranja senzora druge generacije. Rezultati će biti detaljnije obrazloženi u narednim odlomcima (6.3.1-6.3.4).

senzor	**moć razlučivanja**		**kut otklona**		**prije baždarenja**		**poslije baždarenja**		**trans.**
	σ_x (μm	σ_y (μm)	$\bar{\theta}_x$ (μrad)	$\bar{\theta}_y$ (μrad)	σ_{θ_x} (μrad)	σ_{θ_y} (μrad)	$\sigma^b_{\theta x}$ (μrad)	$\sigma^b_{\theta y}$ (μrad)	τ
ns028	1.5	1.7	-6.6	0.9	4.1	5.0	2.1	2.0	0.77
ns011	2.0	2.6	7.6	22.4	6.3	6.0	2.1	1.8	0.86
ns016	1.4	1.6	-7.8	28.0	6.8	9.1	2.2	2.6	0.83
ns024	1.8	2.2	-22.2	19.7	3.7	4.6	2.1	2.5	0.84
ns026	3.3	2.1	4.6	14.7	5.7	7.8	2.4	3.3	0.82
ns030	1.3	1.6	-6.1	3.3	2.9	4.0	2.4	2.0	0.82
ns027	2.2	2.4	-27.5	-4.5	3.1	3.0	2.9	2.0	0.80
ns005	1.9	1.9	8.9	5.7	6.9	5.6	3.9	2.4	0.81
ns007	2.8	4.9	-7.7	14.3	4.7	4.6	2.4	3.3	0.88
ns018	1.7	1.8	21.3	6.6	3.4	6.5	2.6	2.6	0.83
ns029	1.4	1.7	5.0	-3.8	7.4	9.2	3.2	3.4	0.82
ns012	1.7	1.6	-27.6	10.2	3.6	3.5	3.0	2.9	0.88
ns032	2.4	2.7	-4.0	-5.1	4.9	3.7	4.1	3.3	0.79
ns031	3.7	2.1	-8.8	27.4	4.4	10.0	2.8	3.6	0.79
ns035	3.3	3.8	-6.5	-4.3	8.2	11.4	3.1	3.0	0.80
ns023	3.2	3.7	0.1	-10.2	6.7	8.5	2.8	2.3	0.84
ns036	2.9	3.4	-20.5	38.1	7.9	5.0	1.7	1.7	0.84
ns013	3.8	2.6	-15.8	-24.9	5.4	4.1	2.8	2.5	0.81
ns014	2.5	3.2	5.6	3.2	2.2	4.1	1.1	1.8	0.82
us008	2.4	3.3	6.3	11.8	3.7	4.1	2.7	2.4	0.84
us009	2.5	4.0	0.2	12.6	3.4	3.4	2.6	2.8	0.83
us011	1.8	2.0	3.5	6.8	4.3	4.8	3.9	3.5	0.85

Tablica 6.1: Rezultat površinskih ispitivanja senzora ALMY II. Vidi objašnjenje u tekstu.

6.3.1 Moć razlučivanja

Moć razlučivanja (σ_x, σ_y) navedena u tablici 6.1 dobivena je nakon korekcija koje uzimaju u obzir da je koordinatni sustav senzora rotiran u odnosu na koordinatni sustav motora. Slika 6.5 prikazuje raspodjelu ovih veličina za sve testirane senzore.

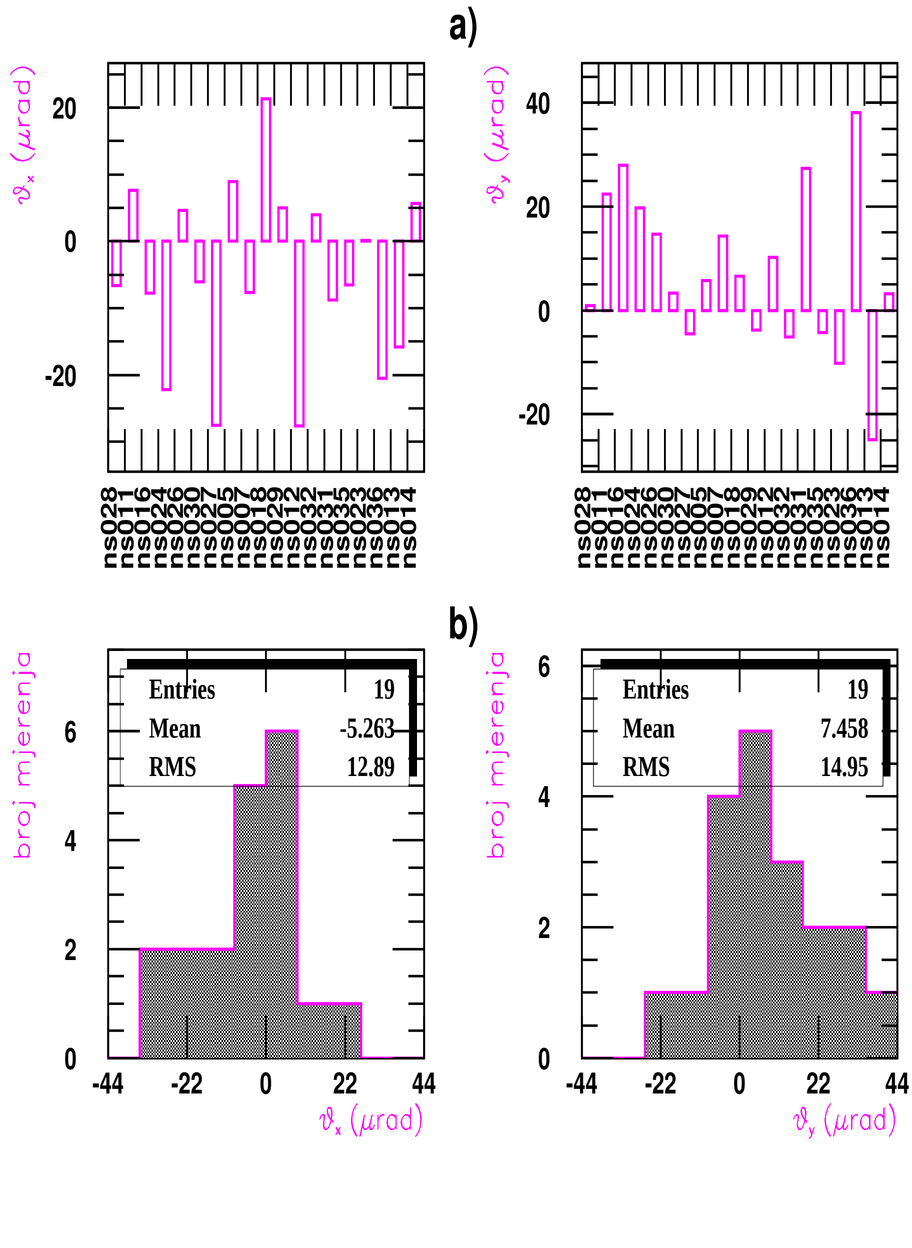


Slika 6.5: Raspodjela moći razlučivanja položaja laserskog snopa u x-smjeru (σ_x) i u y-smjeru (σ_y), dobivena površinskim ispitivanjem senzora ALMY druge generacije.

Prosječna moć razlučivanja senzora ALMY II iznosi 2-3 μm, što je bitno poboljšanje u odnosu na senzore prve generacije, te više nego zadovoljava postavljene zahtjeve.

6.3.2 Kut otklona laserskog snopa

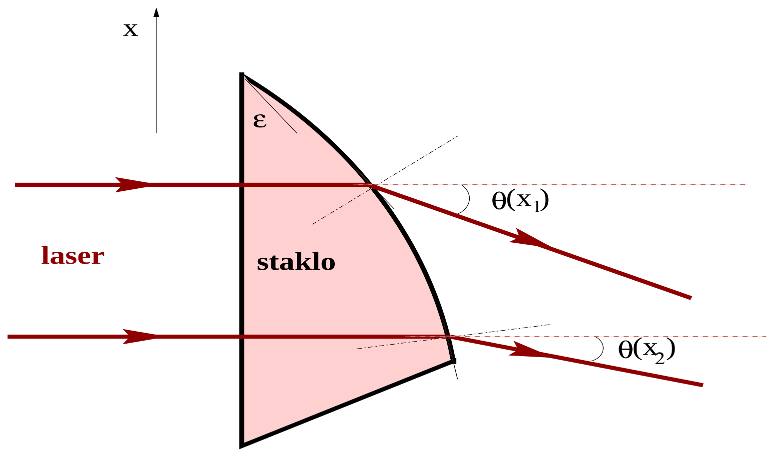
Iz tablice 6.1 može se uočiti da prosječni kut otklona varira od jednog do drugog senzora, u rasponu od -30 do 30 μrad (vidi također sliku 6.6). Stoga je nužno <u>*baždariti*</u> svaki senzor - tj. izmjeriti kut otklona kao funkciju položaja na površini senzora.



Slika 6.6: Prosječni kut otklona $\bar{\theta}_{x,y}$. (a) za svaki pojedini senzor; (b) raspodjela vrijednosti prikazanih u (a).

Iz tablice 6.1 također se vidi da neodređenost u kutu otklona ($\sigma_{\theta x,y}$) ne zadovoljava (u prosjeku) zahtjeve postavljene za senzore u sustavu za nadzor položaja u detektoru ATLAS. No, to nije krajnje ograničenje preciznosti senzora, jer se uz statističke pogreške mjerenja (koje se ne mogu izbjeći) javlja dodatni sistematski efekt. Utjecaj tog efekta može se umanjiti odgovarajućim korekcijama.

Naime, u površinskim raspodjelama kuta otklona (vidi npr. sliku 6.2) može se uočiti kontinuirana varijacija u ovisnosti o položaju na površini senzora. Pritom treba upozoriti da ova varijacija nije posljedica efekata interferencije, jer je na stražnju stranu staklene podloge senzora ALMY II nanesen protu-reflektivni sloj. Porijeklo varijacija može se objasniti zakrivljenošću dviju ploha staklene podloge (vidi sliku 6.7). Uslijed takve zakrivljenosti kut otklona će se jednoliko smanjivati (ili rasti) s promjenom položaja (x,y) na površini senzora.



Slika 6.7: Pojednostavljeni prikaz utjecaja zakrivljenosti plohe staklene podloge na kut otklona θ laserskog snopa.

Varijacije se mogu opisati analitičkom funkcijom s određenim brojem parametara. Na taj način, umjesto da se baždarenjem mjeri samo prosječni kut otklona (tj. dva parametra, $\bar{\theta}_x$ i $\bar{\theta}_y$), za svaki se senzor određuju dvije baždarne funkcije θ_x(x,y) i θ_y(x,y), sa ukupno *12 baždarnih parametara*:

$$\theta_x(x,y) = p_{1x} + p_{2x} \cdot x + p_{3x} \cdot y + p_{4x} \cdot x \cdot y + p_{5x} \cdot x^2 + p_{6x} \cdot y^2 \qquad (6.3)$$

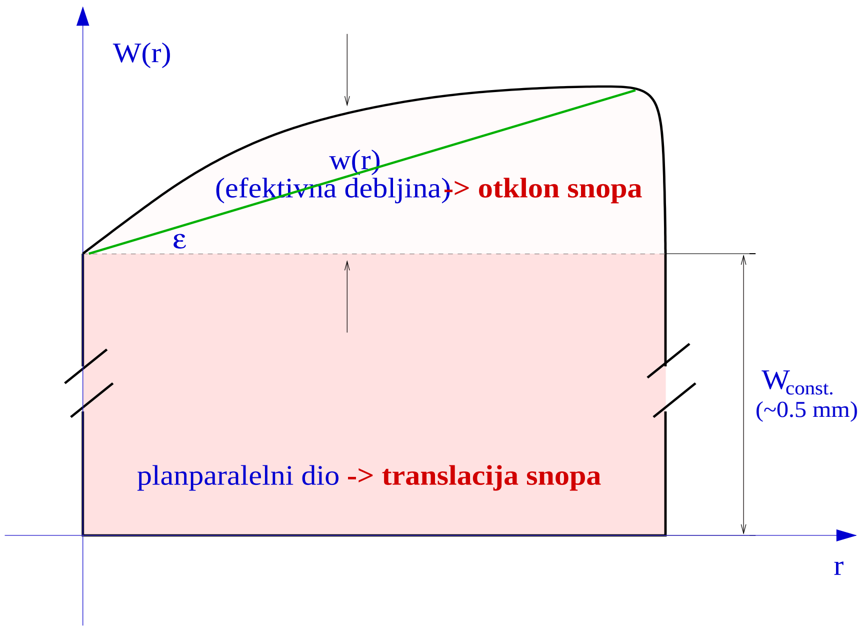
$$\theta_y(x,y) = p_{1y} + p_{2y} \cdot x + p_{3y} \cdot y + p_{4y} \cdot x \cdot y + p_{5y} \cdot x^2 + p_{6y} \cdot y^2 \qquad (6.4)$$

Pritom su parametri p_{1x} i p_{1y} ekvivalentni vrijednostima $\bar{\theta}_x$, odnosno $\bar{\theta}_y$.

Na temelju izmjerenih baždarnih funkcija može se za dani senzor rekonstruirati oblik plohe staklene podloge (jer je otklon određen nagibom plohe u odnosu na upadni laserski snop). Ishodište koordinatnog sustava senzora definiramo u jednom od četiri ugla staklene podloge, uz pretpostavku da laserski snop upada okomito na tu podlogu. Tada je debljina staklene podloge W(r) u ovisnosti o udaljenosti $r=(x^2+y^2)^{1/2}$ dana izrazom:

$$W(r) = W_{const} + w(r) = W_{const} + \int_0^r \frac{\theta(r)}{n-1} dr, \qquad (6.5)$$

gdje je n indeks loma za staklo, W^{const} je debljina planparalelnog dijela staklene podloge (približno 0.5 μm). w(r) je preostala *efektivna debljina* koja daje informaciju o kutu klina i zakrivljenosti staklene plohe (vidi sliku 6.8).



Slika 6.8: Pojednostavljeni prikaz poprečnog presjeka staklene podloge. Prolazom snopa kroz planparalelni dio dolazi do njegove translacije. Efektivna debljina dana je prosječnim kutom klina ϵ (zelena linija), te dodatnom zakrivljenošću staklene plohe, koji uzrokuju otklon laserskog snopa.

Efektivna debljina može se izraziti kao

$$w(r) = w_{klin}(r) + w_{zak}(r), \tag{6.6}$$

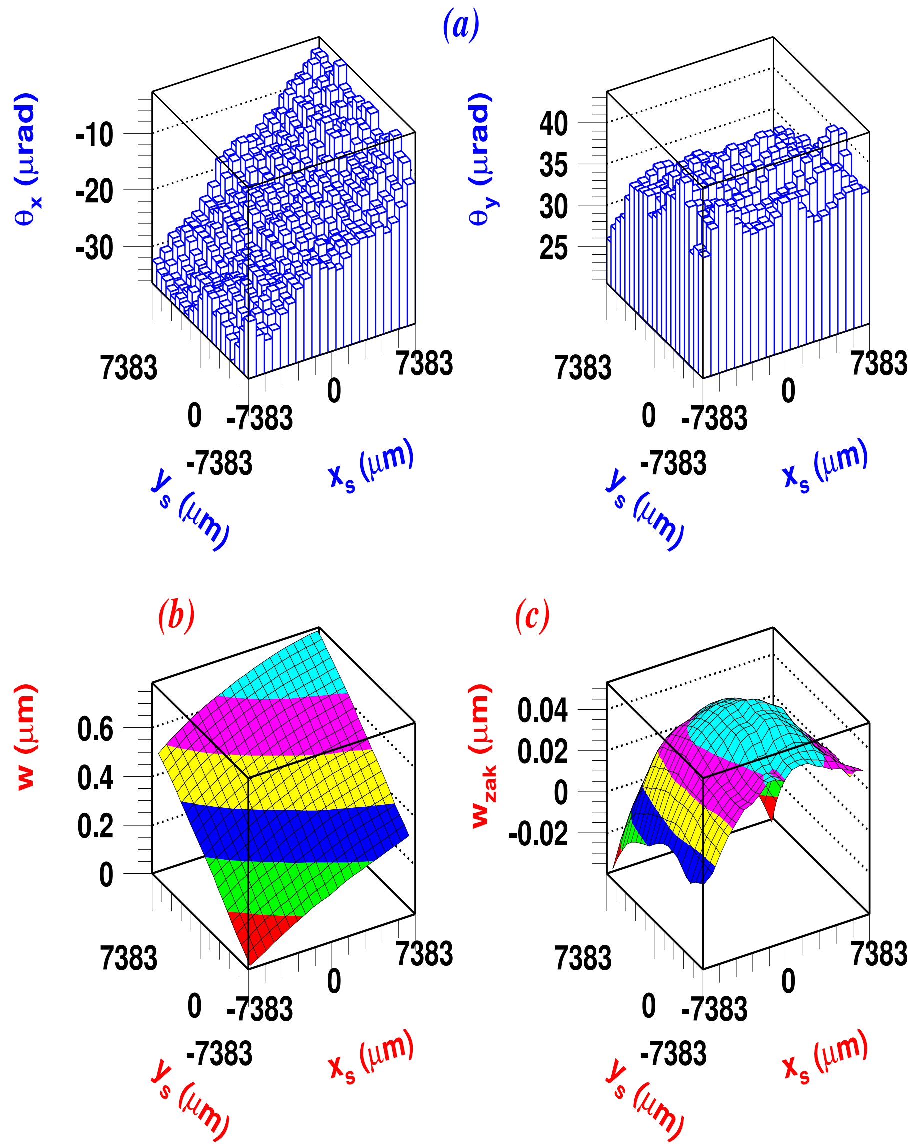
gdje je w_{klin} doprinos prosječnog kuta klina, a w_{zak} doprinos koji potječe od zakrivljenosti plohe.

Slika 6.9 prikazuje površinske raspodjele kuta otklona ($\theta_{x,y}$), te pripadnu rekonstruiranu efektivnu debljinu w(r), kao i utjecaj zakrivljenosti plohe $w_{zak}(r)$, za senzor ns036.

Opažena ukupna efektivna debljina w(s=14 mm) iznosi $\sim$0.7 μm (gdje je s širina ispitivane površine senzora). To je upravo vrijednost predviđena izrazom

$$w(s) = \frac{\bar{\theta}}{n-1} \cdot s, \tag{6.7}$$

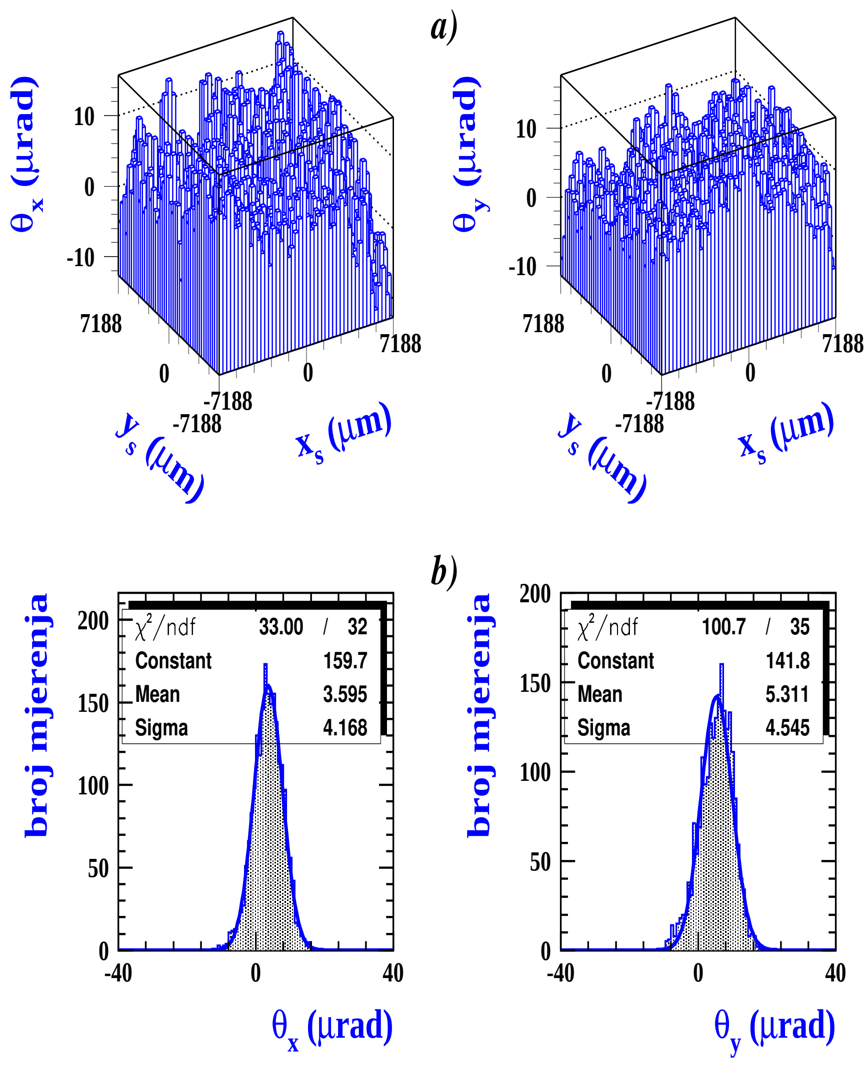
pri čemu je $\bar{\theta}$ $\sim$40 μrad (vidi sliku 6.9(a)). Mjera zakrivljenosti određena je iznosom od w_{zak} $\sim$0.06 μm.



Slika 6.9: Površinske raspodjele dobivene ispitivanjem senzora ns036. (a) komponente kuta otklona laserskog snopa, θ_x i θ_y; (b) rekonstruirana efektivna debljina staklene podloge; (c) doprinos zakrivljenosti plohe efektivnoj debljini, w$_{zak}$.

Korelacije između prosječnog kuta otklona i kuta klina mogu se uočiti i u rezultatima površinskih ispitivanja nekih senzora prve generacije. Radi se o senzorima us008, us009 i us011, čija su svojstva također navedena u tablici 6.1. Iako ovi senzori nemaju protu-reflektivni sloj na stražnjoj strani staklene podloge, u površinskim se raspodjelama ipak ne opažaju efekti interferencije (vidi sliku 6.10). Stoga se može zaključiti da je kut klina ovih senzora vrlo malen, pa na temelju relacije 6.1 očekujemo i da mjereni kut otklona bude malen. Rezultati mjerenja prikazani u tablici 6.1 i na slici 6.10 u skladu su s očekivanjima.

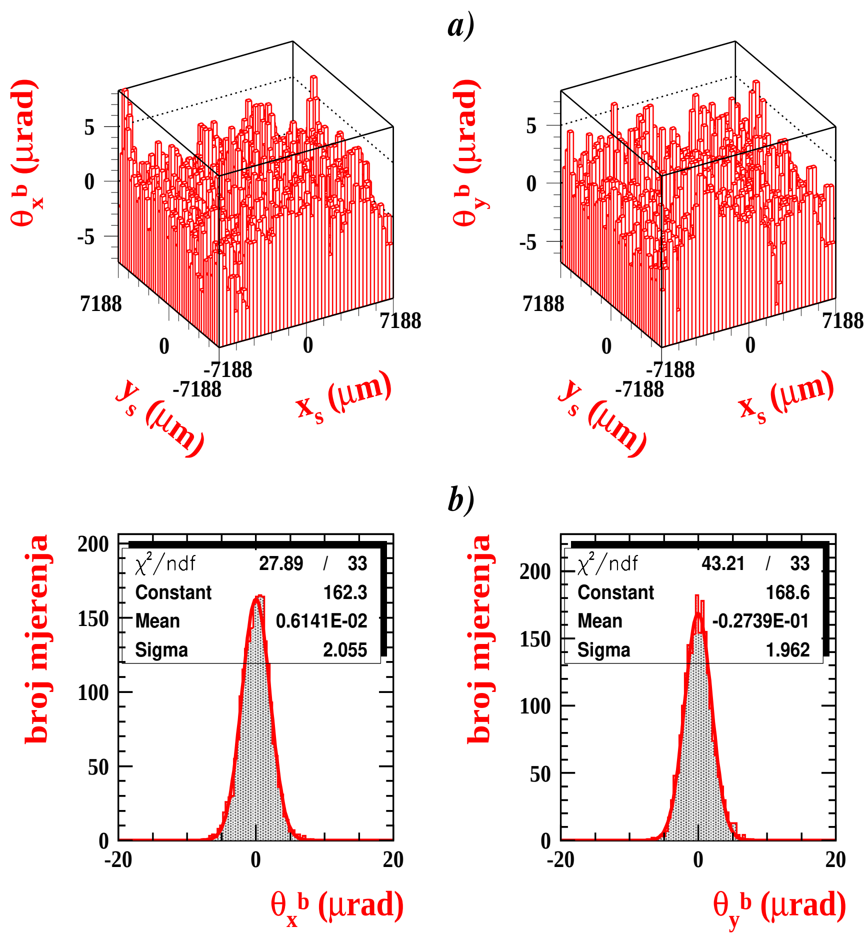
Treba napomenuti da su spomenuta tri senzora ALMY I samo slučajno izrađena s malim kutom klina. Općenito je kut klina staklene podloge za prve dvije generacije senzora ALMY različit od nule, te se radi izbjegavanja efekata interferencije *mora* nanijeti dodatni protu-reflektivni sloj.



Slika 6.10: Rezultati površinskog ispitivanja senzora us011, iz generacije ALMY I. (a) površinske raspodjele kuta otklona laserskog snopa, θ_x, θ_y; (b) jednodimenzionalne projekcije raspodjela iz (a).

6.3.3 Efikasnost baždarnog postupka

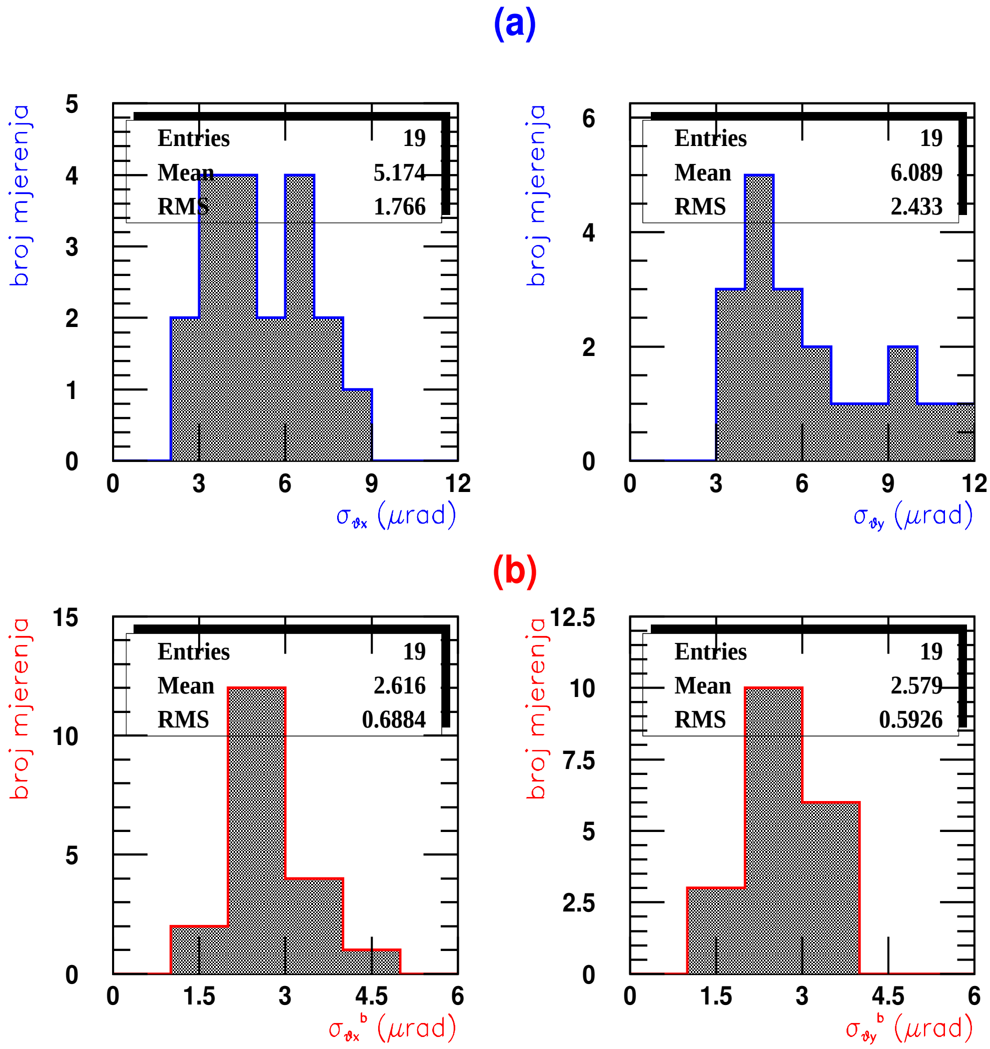
Prethodno opisani utjecaj zakrivljenosti staklene podloge na neodređenost u kutu otklona laserskog snopa može se izbjeći *baždarenjem senzora*, tj. prilagodbom 6-parametarskih *baždarnih funkcija* na površinske raspodjele $\theta_{x,y}$. Efikasnost korekcije može se ispitati promatranjem razlike $\theta^b_{x,y}$ između izmjerene raspodjele kuta otklona i one opisane baždarnom funkcijom (vidi sliku 6.11).



Slika 6.11: Efikasnost baždarnog postupka za senzor ns028. (a) razlika izmjerenog kuta otklona i onog dobivenog baždarenjem, u ovisnosti o položaju (x_s, y_s) na površini senzora; (b) jednodimenzionalna projekcija raspodjela iz (a).

Na slici se opaža da je prosječna vrijednosty $< \theta^b_{x,y} >$ ("Mean") vrlo bliska nuli, što se i očekuje iz same definicije prilagodbe. Standardna devijacija ("Sigma") govori o konačnoj neodređenosti ($\sigma^b_{\theta x}$ i $\sigma^b_{\theta y}$) u mjerenju kuta otklona, koja preostaje nakon baždarenja. Npr. za senzor ns028 je $\sigma^b_{\theta x,y}$ <2 μrad.

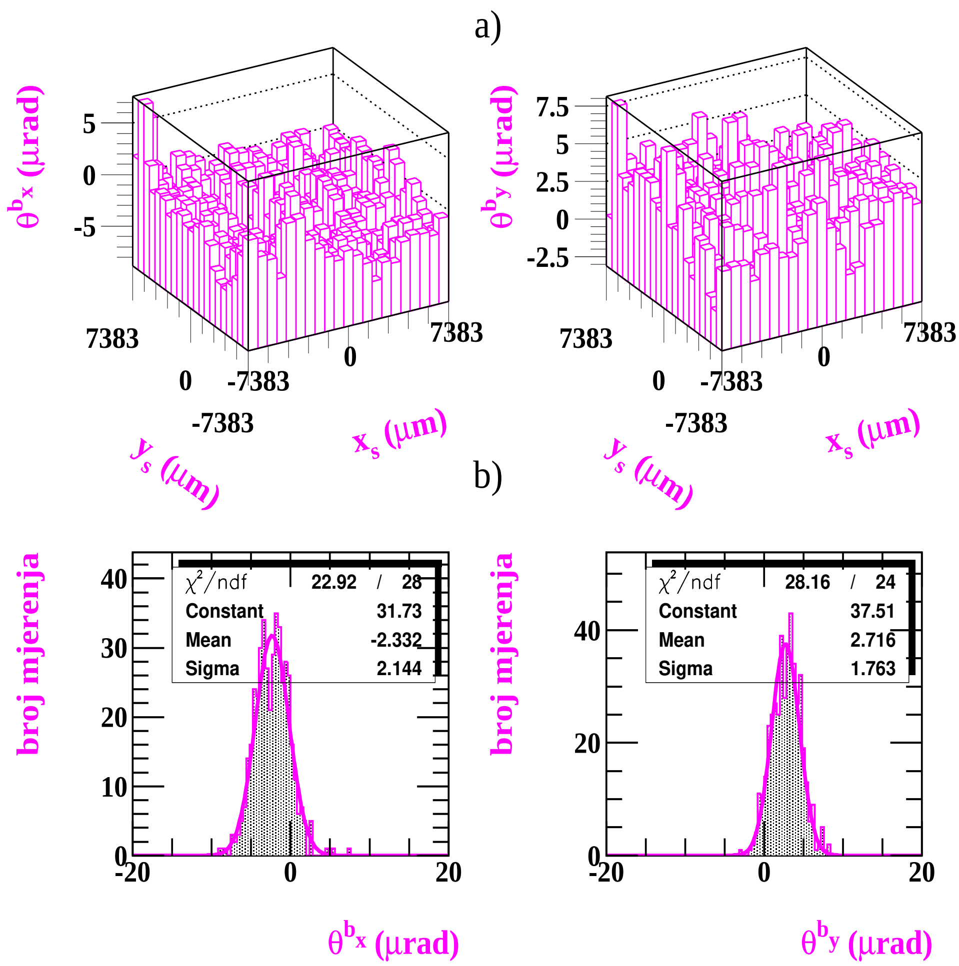
Slika 6.12 prikazuje raspodjelu neodređenosti kuta otklona za sve testirane senzore ALMY II, i to prije (a) i nakon primjene baždarnih parametara (b).



Slika 6.12: Neodređenost u mjerenju kuta otklona laserskog snopa, za sve ispitane senzore ALMYII. (a) bez primjene baždarnih parametara; (b) nakon primjene baždarnih parametara.

Prije primjene potpunog baždarnog postupka kut otklona ne može se odrediti s preciznošću boljom od 5-6 μrad. To nije dovoljno za primjenu senzora u sustavu za nadzor položaja. Jedan od razloga je i zanemarivanje zakrivljenosti plohe staklene podloge tog senzora. Primjenom dviju 6-parametarskih funkcija (izmjerenih za svaki senzor pojedinačno) neodređenost kuta otklona smanjuje se na 2-3 μrad.

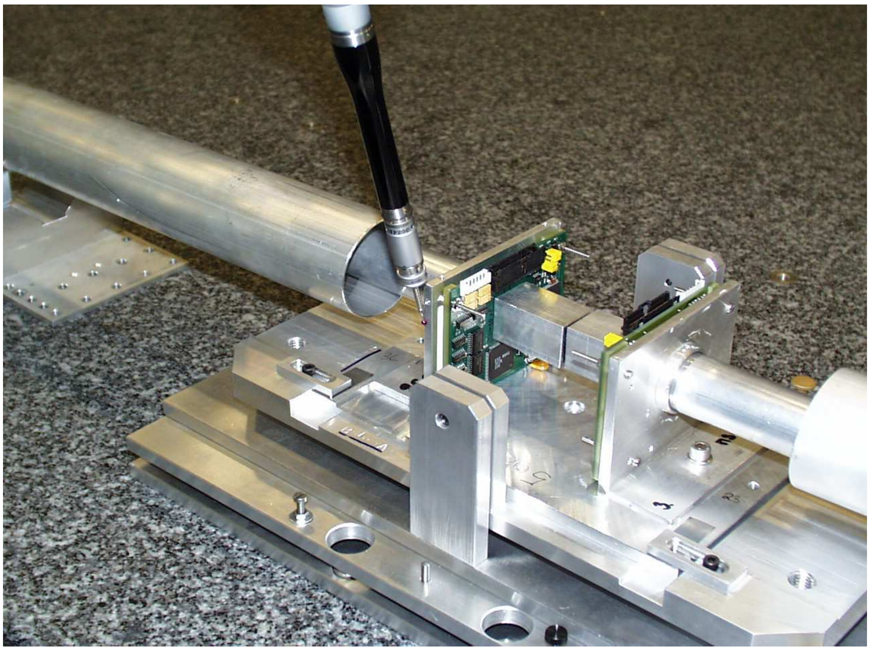
Ispitana je i ovisnost baždarnog postupka o veličini *koraka motora* tijekom površinskog ispitivanja. U tu svrhu je za jedan od senzora površina od 14x14 mm^2 ispitana dva puta. Prvo je ispitivanje izvedeno u 46x46, a drugo u 21x21 koraka. Baždarni parametri dobiveni prvim ispitivanjem primijenjeni su za korekciju drugog ispitivanja. Slika 6.13 prikazuje efikasnost baždarenja, tj. razliku $\theta^b_{x,y}$ između raspodjele kuta otklona izmjerene u 21x21 koraka i one opisane baždarnom funkcijom.



Slika 6.13: Razlika θ^b između površinske raspodjele kuta otklona izmjerene u 21x21 koraka i one opisane baždarnom funkcijom. Baždarna funkcija dobivena je posebnim površinskim ispitivanjem u 46x46 koraka. (a) površinske raspodjele veličina θ^b_x, θ^b_y; (b) projekcije raspodjela prikazanih pod (a).

Srednje vrijednosti prikazanih razlika približno su jednake nuli. Može se zaključiti da baždarni postupak unutar dvije standardne devijacije ne ovisi o veličini koraka u kojima se ispituje senzorska površina.

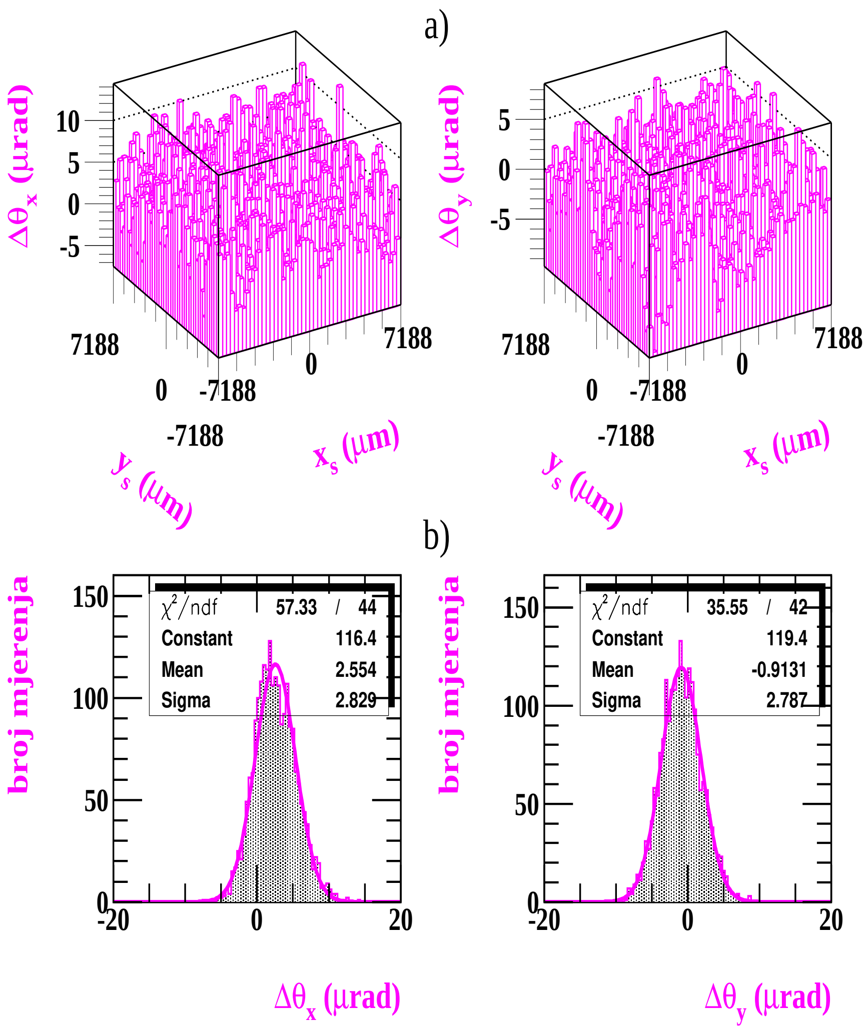
Svi prethodno opisani rezultati baždarenja dobiveni su za jednu (tzv. nominalnu) od dvije moguće orijentacije senzora (u odnosu na smjer upada laserskog snopa). Polarni sustav za nadgledanje položaja u mionskom spektrometru detektora ATLAS predviđa upotrebu optičkih teleskopa (vidi sliku 6.14).



Slika 6.14: Optički teleskop ALMY. Čine ga dva senzora ALMY II, nominalne i invertirane orijentacije u odnosu na smjer laserskog snopa.

Teleskop čine dva međusobno paralelno položena senzora. Jedan senzor okrenut je svojom prednjom stranom prema upadnom laserskom snopu (*nominalna orijentacija*), a na drugi senzor laserski snop upada sa stražnje strane (*invertirana orijentacija*).

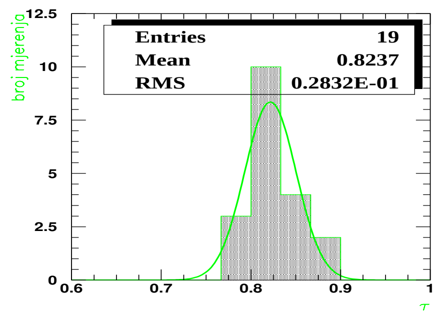
Očekuje se da prosječni kut otklona laserskog snopa ne ovisi o orijentaciji senzora. Jedina je razlika da je u invertiranom položaju senzor rotiran za 180^o oko y-osi, pa x-komponenta kuta (θ_x) mijenja predznak. Radi provjere ove pretpostavke za nekoliko je senzora površinsko ispitivanje izvršeno u obje orijentacije. Slika 6.15 prikazuje raspodjele razlika dvaju površinskih ispitivanja (pri nominalnoj i invertiranoj orijentaciji) senzora ns030. Promjena predznaka x-komponente kuta uzeta je u obzir. Opažene razlike približno su jednake nuli (unutar jedne standardne devijacije), kao što je i očekivano. U suprotnom bi broj baždarnih parametara za dani senzor bio dvostruko veći (12 za senzor u nominalnoj orijentaciji i 12 u invertiranoj).



Slika 6.15: Razlika rezultata dvaju površinskih ispitivanja senzora ns030. Prvo ispitivanje izvršeno je na senzoru nominalne orijentacije, a drugo u invertiranoj orijentaciji. (a) površinske raspodjele razlika $\Delta\theta_x$ i $\Delta\theta_y$ u kutu otklona; (b) jednodimenzionalne projekcije raspodjela iz (a).

6.3.4 Transmitivnost

Jedno od poboljšanja u drugoj generaciji senzora je i povećana transmisija laserskog snopa pri prolazu kroz senzor. To je posljedica upotrebe tanje staklene podloge, te protu-reflektivnog sloja. Slika 6.16 prikazuje raspodjelu transmitivnosti za ispitane senzore ALMY II, dobivenu za lasersku svjetlost valne duljine 784 nm. Prosječna transmitivnost iznosi oko 82% (u usporedbi sa 78% za senzore ALMY I). Time je omogućena implementacija i do 10 senzora duž putanje jednog laserskog snopa.



Slika 6.16: Transmitivnost laserskog snopa pri prolazu kroz senzore ALMY II, ispitana pri valnoj duljini laserske svjetlosti od 784 nm.

Pri manjim valnim duljinama osjetljivost silicijskog sloja na lasersku pobudu je veća, a i efikasnost protureflektivnog sloja nije optimalna. Stoga se očekuje da će u tom slučaju transmitivnost biti manja. Ovo predviđanje provjereno je dodatnim površinskim ispitivanjima gdje je upotrebljena laserska dioda valne duljine 690 nm, te He-Ne laser valne duljine 630 nm. Rezultati su prikazani u tablici 6.2.

senzor	633 nm	690 nm	784 nm
ns016	0.15	0.63	0.83
ns029	0.15	0.64	0.82
ns018	0.15	0.64	0.83
ns005	0.21	0.63	0.87
ns007	0.20	0.68	0.80
ns027	0.14	0.63	0.80
ns030	0.14	0.64	0.82
ns026	0.14	0.63	0.81
ns024	0.14	0.63	0.83
ns032	0.15	0.62	0.77
ns011	0.19	0.62	0.85
ns028	0.14	0.61	0.77

Tablica 6.2: Transmitivnost laserskog snopa pri prolazu kroz senzor ALMY II. Prikazane su vrijednosti za tri različite valne duljine (633 nm, 690 nm i 784 nm).

6.4 Ovisnost o kutu upada laserskog snopa

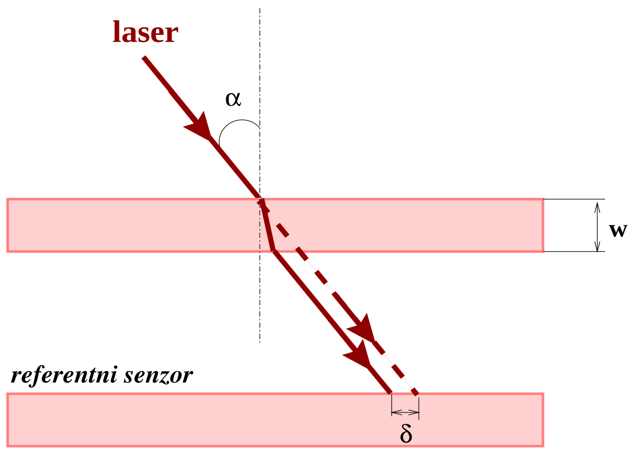
Sva prethodno opisana mjerenja izvedena su u uvjetima okomitog upada laserskog snopa na površinu senzora. U ovom odlomku razmotrit ćemo kako se mijenja mjereni pomak laserskog snopa Δ ako svjetlost upada na senzor pod određenim kutom α u odnosu na okomitu os. Pomak je mjeren samo jednim referentnim senzorom, tako da je osim otklona ($\Delta_B = \theta \cdot d$) prisutan i doprinos translacije $\Delta_A = \delta$ laserskog snopa (vidi izraz 6.8).

$$\Delta = \Delta_A + \Delta_B = \delta + \theta \cdot d \tag{6.8}$$

Pritom je θ kut otklona laserskog snopa, a d je udaljenost od ispitivanog do referentnog senzora.

A) Translacija laserskog snopa

Do translacije Δ_A dolazi pri prolazu snopa kroz materijal oblika planparalelne ploče, ako kut upada α nije jednak nuli (vidi sliku 6.17). (Naziv translacija potječe zbog činjenice da mjerenje ovog pomaka ne ovisi o udaljenosti d, tj. ne raste proporcionalno udaljenosti.)



Slika 6.17: Translacija δ laserskog snopa pri prolazu kroz planparalelnu ploču debljine W javlja se kao posljedica konačnog kuta upada α.

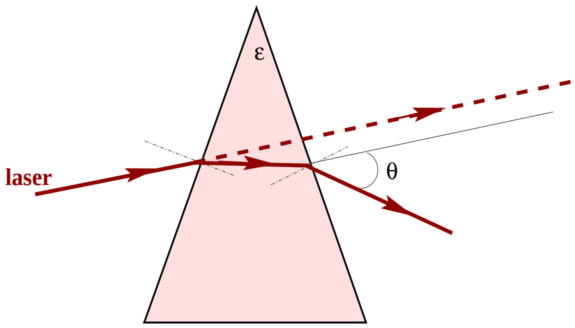
Za male kutove α translacija se može aproksimirati izrazom

$$\delta = \frac{n-1}{n} \cdot W \cdot \frac{\pi}{180^o} \cdot \alpha, \tag{6.9}$$

gdje je n indeks loma za staklo ($n \approx 1.5$), a W je debljina staklene podloge, $W = (0.50 \pm 0.05)$ mm.

B) Otklon laserskog snopa

Najveći doprinos pomaku laserskog snopa daje staklo, jer je to senzorski sloj najveće debljine. Ako dvije plohe staklene podloge međusobno nisu savršeno paralelne (vidi sliku 6.18), efekt prizme uzrokovat će otklon laserskog snopa iz prvobitnog smjera. Kut otklona θ određen je relacijom 6.1.



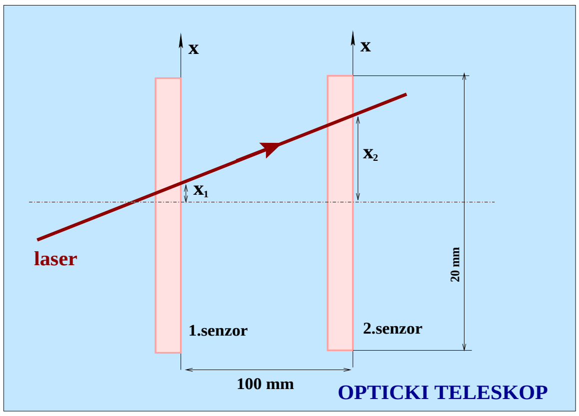
Slika 6.18: Otklon laserskog snopa prolazom kroz staklenu prizmu.

Mjerenjem ovisnosti $\frac{\Delta}{d}(\alpha)$ može se detaljnije proučiti relacija 6.8. Na temelju prethodno navedenih izraza slijedi da se ova ovisnost može dobro opisati pravcem:

$$\frac{\Delta}{d}(\alpha) = \frac{n-1}{n} \cdot \frac{W}{d} \cdot \frac{\pi}{180^o} \cdot \alpha + \theta \tag{6.10}$$

Ispitivan je pomak laserskog snopa prolazom kroz senzor ns032 u ovisnosti o kutu upada α ∈(-10^o, 10^o). Kut upada mjeri se pomoću dva senzora optičkog teleskopa i dan je relacijom (vidi sliku 6.19):

$$tan\ \alpha = \frac{(x_2 - x_1)\ mm}{100\ mm} \tag{6.11}$$

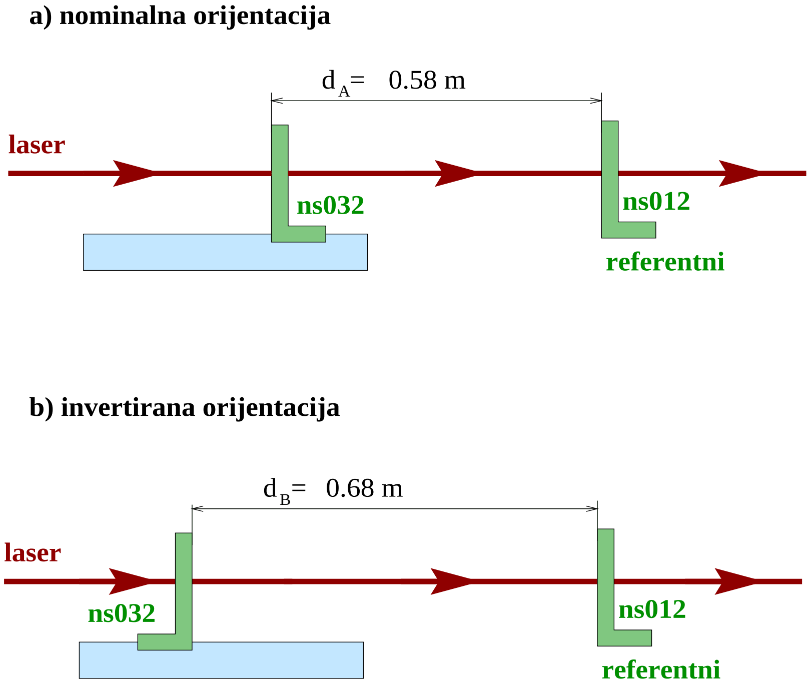


Slika 6.19: Postava za mjerenje kuta upada α laserskog snopa na površinu senzora.

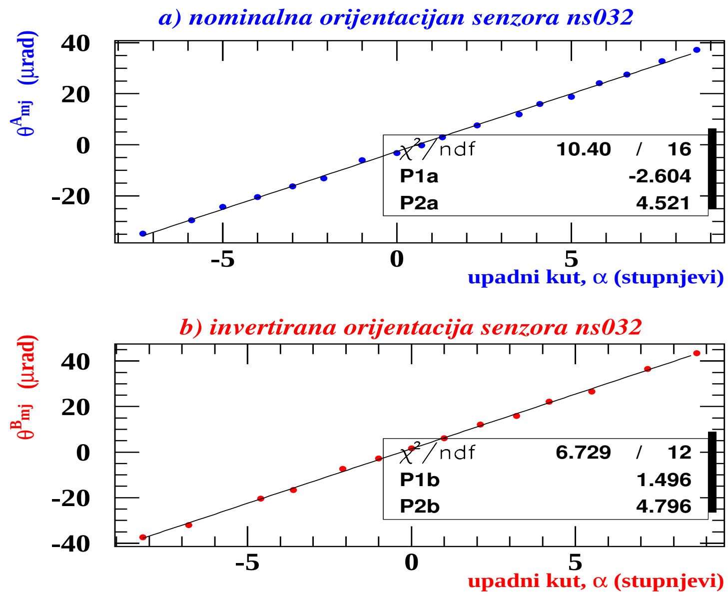
Pomak je mjeren referentnim senzorom ns012. Mjerenje je vršeno posebno za slučaj nominalne (mjerenje (a)), te posebno za invertiranu orijentaciju senzora ns032 (mjerenje (b)), kao što je naznačeno na slici 6.20. Mjerene su ovisnosti $\theta^{a,b}_{mj}=\frac{\Delta}{d_{a,b}}$, o kutu α.

$$\theta^a_{mj}(\alpha) = \frac{\Delta}{d_a} = \theta + \frac{\delta}{d_a} = \theta + \frac{n-1}{n} \cdot \frac{w}{d_a} \cdot \frac{\pi}{180^o} \cdot \alpha, \tag{6.12}$$

$$\theta^b_{mj}(\alpha) = \frac{\Delta}{d_b} = -\theta + \frac{\delta}{d_b} = -\theta + \frac{n-1}{n} \cdot \frac{w}{d_a} \cdot \frac{\pi}{180^o} \cdot \alpha. \tag{6.13}$$



Slika 6.20: Mjerenje ovisnosti pomaka laserskog snopa o kutu upada α na površinu senzora ns032, (a) pri nominalnoj orijentaciji senzora ns032, te (b) pri invertiranoj orijentaciji senzora ns032.



Slika 6.21: Ovisnost pomaka laserskog snopa $\theta_{mj}^{A,B}$ o kutu upada α na površinu senzora ns032, (a) pri nominalnoj orijentaciji senzora ns032, te (b) pri invertiranoj orijentaciji senzora ns032.

Rezultati mjerenja prikazani su na slici 6.21. Prvi parametar (p_{1a} i p_{1b}) dobiven prilagodbom pravca na točke mjerenja definira prosječni kut otklona laserskog snopa (kroz senzor ns032).

$$p_{1a} = -2.604\ \mu rad\ (\equiv \theta) \tag{6.14}$$

$$p_{1b} = 1.496\ \mu rad\ (\equiv -\theta) \tag{6.15}$$

Ova se dva parametra slažu u okviru pogreške mjerenja. U invertiranoj orijentaciji kut otklona ima suprotan predznak.

Vrijednost drugog parametra prilagodbe (p_{2a} i p_{2b}) daje informaciju o translaciji laserskog snopa (vidi izraze 6.12 i 6.13):

$$p_{2a,b} = \frac{n-1}{n} \cdot \frac{W}{d_{a,b}} \cdot \frac{\pi}{180^o} \tag{6.16}$$

Uvrštavanjem izmjerenih udaljenosti d_a=(0.58±0.01) m i d_b=(0.68±0.01) m u 6.16 dobivamo

$$p_{2a} = 5.0 \pm 0.5,$$

$$p_{2b} = 4.3 \pm 0.5,$$

što je u dobrom slaganju s eksperimentalno dobivenim vrijednostima, p_{2a}=4.5 i p_{2b}=4.8 (vidi slike 6.20 i 6.21).

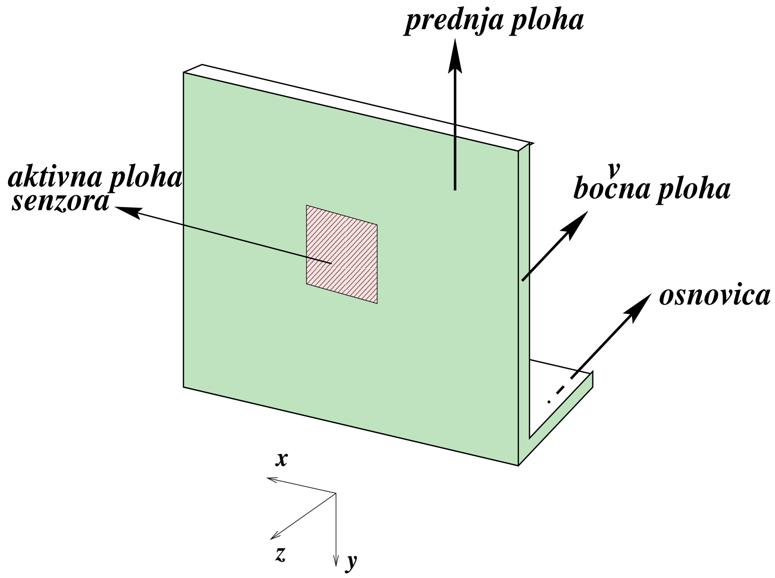
Na temelju ovih ispitivanja zaključujemo da pri konačnom kutu upada laserskog snopa na površinu senzora dolazi do translacije koja se mora uzeti u obzir prilikom rekonstrukcije laserske putanje kroz veći broj senzora.

6.5 Mehanička preciznost pozicioniranja

Moć razlučivanja položaja od 2-3 μrad omogućuje vrlo precizno mjerenje *relativnih pomaka* laserskog snopa. Precizno poznavanje kuta otklona snopa također je nužno za točnu rekonstrukciju putanje laserskog snopa kroz veći broj senzora.

Osim ispitivanja ovih veličina, potrebno je izvesti još jedno dodatno mjerenje bez kojeg nije moguće točno mjerenje *apsolutnog* položaja laserskog snopa. Apsolutni položaj laserskog snopa u određenom globalnom koordinatnom sustavu moguće je odrediti samo uz točno poznavanje položaja samih senzora u istom sustavu.

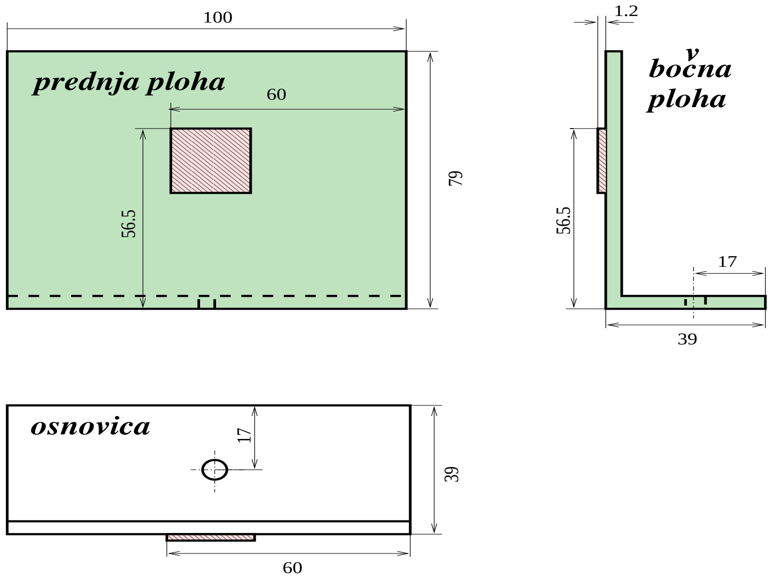
Jedan od uvjeta za točno poznavanje globalnih koordinata senzora jest i precizno poznavanje položaja aktivne površine senzora u odnosu na metalni okvir na koji je učvršćena (slika 6.22). Na slici 6.23 naznačen je nominalni položaj aktivne plohe. Zbog ograničene preciznosti prilikom izrade senzora položaj aktivne površine može biti odmaknut od nominalnih vrijednosti.



Slika 6.22: Pojednostavljeni prikaz aktivne plohe senzora ALMY II učvršćene na metalni okvir.

Tri su plohe izrađene mikrometarskom preciznošću (vrlo glatke). Na slici 6.22 označene su osjenčano - prednja strana, desna bočna strana i donja strana osnovice. Nominalni položaj aktivne senzorske plohe određuje se u odnosu na ove referentne precizno izrađene plohe. Širina aktivne površine definirana je kao udaljenost između vanjskog ruba prve i posljednje ITO-elektrode, s=(312.5·64-10) μm=19 990 μm. Stoga je središte te plohe udaljeno 50.005 mm od bočne plohe, te 46.505 mm od osnovice.

Nekoliko različitih mjerenja izvršeno je radi provjere točnosti pozicioniranja nominalnog položaja aktivne plohe senzora. Za jedno od mjerenja poslužio je opisani eksperimentalni sustav za površinsko ispitivanje senzora (slika 5.1). Laser je učvršćen u vrlo stabilan položaj, a referentnim senzorima konstantno je provjeravana stabilnost položaja laserskog snopa. Platforma optičkog teleskopa također je dobro učvršćena. Na taj način senzor koji se montira na platformu uvijek mjeri isti položaj laserskog snopa. Ova reproducibilnost je testirana uzastopnim montiranjem i demontiranjem senzora ns031 (15 puta, vidi tablicu 6.3 i sliku 6.24).



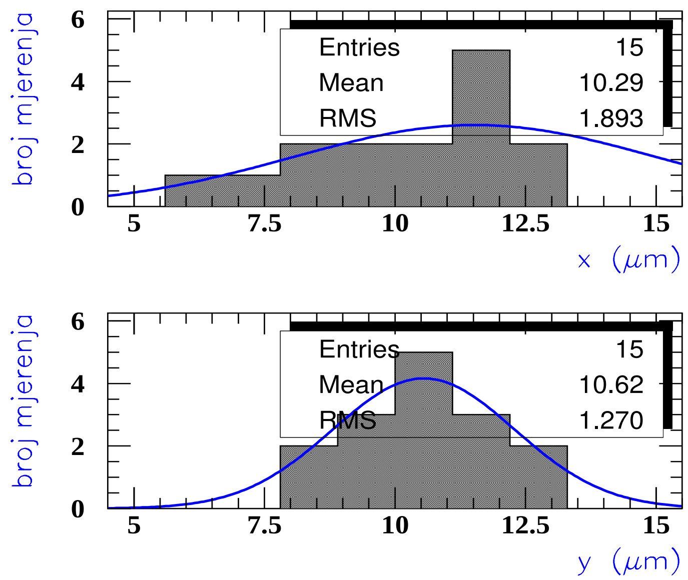
Slika 6.23: Nominalni položaj aktivne plohe senzora na metalnom okviru (izraženo u milimetrima). Prikazani su nacrt, tlocrt i bokocrt.

	x (μm)	y (μm)
1.	6.2	12.6
2.	8.0	12.0
3.	11.6	10.2
4.	11.6	10.5
5.	12.2	8.7
6.	7.7	12.7
7.	9.8	11.8
8.	9.6	10.8
9.	8.6	10.5
10.	10.2	11.6
11.	12.6	10.7
12.	11.7	9.9
13.	10.4	9.5
14.	11.6	8.7
15.	12.6	9.1

Tablica 6.3: Reproducibilnost montiranja senzora na platformu optičkog teleskopa.

Može se zaključiti da je reproduciblinost pozicioniranja senzora približno 2 μm. To znači da svaki od senzora možemo montirati sa dovoljnom točnošću u približno isti položaj na platformi optičkog teleskopa. Svaki od tih senzora mjeri položaj laserskog snopa (koji je tijekom ovog postupka stabilan).

Razlike u mjerenom položaju snopa od jednog do drugog senzora govore o relativnom odmaku aktivne senzorske plohe od nominalnog položaja na metalnom okviru. Treba naglasiti da je ovo mjerenje samo relativno - možemo odrediti samo u kojoj je mjeri aktivna ploha jednog senzora pomaknuta u odnosu na plohu drugog senzora, ali ne možemo izmjeriti apsolutni položaj te plohe na metalnom okviru. Stoga proizvoljno odabiremo da odmak za senzor ns031 bude jednak nuli, te mjerimo odmak aktivne plohe svih ostalih senzora u odnosu na senzor ns031.



Slika 6.24: Raspodjela pozicioniranja senzora na platformu optičkog teleskopa. Položaj senzora definiran je koordinatama (x, y). Pozicioniranje je testirano 15 puta uzastopce.

Opisano mjerenje izvedeno je za šest senzora koji će kasnije biti upotrebljeni za konačan test njihove primjenljivosti u sustavu za nadzor položaja. Ovaj test primjenjljivosti testirat će sustav od 6 senzora ALMY instaliranih na 3 platforme optičkih teleskopa, kao što će biti detaljnije opisano u jednom od sljedećih poglavlja.

Mjerenje odmaka za svaki je senzor ponovljeno 6 puta - pozicioniranjem u obje udubine na svakoj od tri platforme teleskopa. U tablici 6.4 navedeni su rezultati ovih mjerenja.

Ovisno o upotrebljenoj udubini, izmjerene vrijednosti variraju oko 5 μm. Za neke senzore mehanički odmak od nominalnog položaja iznosi i do 20 μm. Da bi se osiguralo precizno mjerenje apsolutnog položaja laserskog snopa, ovi se mehanički odmaci također moraju uzeti u obzir, tj. predstavljaju *dva dodatna parametra* za dani senzor.

Tablica 6.5 prikazuje potpuni skup baždarnih parametara (koji opisuju mehanički odmak i otklon laserskog snopa) za šest prethodno spomenutih senzora.

senzor → udubina ↓	ns031(μm)		ns035(μm)		ns023(μm)		ns036(μm)		ns013(μm)		ns014(μm)	
	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
p-31	0.0	0.0	3.0	-1.3	0.0	3.9	7.9	-15.4	12.7	-19.8	14.8	-15.1
p-35	0.0	0.0	2.3	-2.0	-18.5	14.1	6.5	-13.7	13.7	-20.2	15.6	-16.7
p-23	0.0	0.0	-1.5	-2.5	-11.8	8.5	2.8	-16.6	10.9	-22.6	16.1	-17.9
p-36	0.0	0.0	-1.4	-3.7	-13.7	10.1	3.0	-14.1	11.1	-20.4	13.7	-17.9
p-13	0.0	0.0	3.1	-1.3	-2.8	7.4	0.5	-12.5	5.0	-18.8	17.3	-14.4
p-14	0.0	0.0	4.0	0.9	-5.0	3.6	6.0	-12.8	14.9	-20.0	17.4	-15.0
prosjek $(\bar{\Delta x}, \bar{\Delta y})$			1.6	-1.7	-8.6	7.9	4.4	-14.1	11.4	-20.3	15.8	-16.2
pogreška			2.4	1.5	7.1	4.0	2.8	1.6	3.5	1.3	1.5	1.6

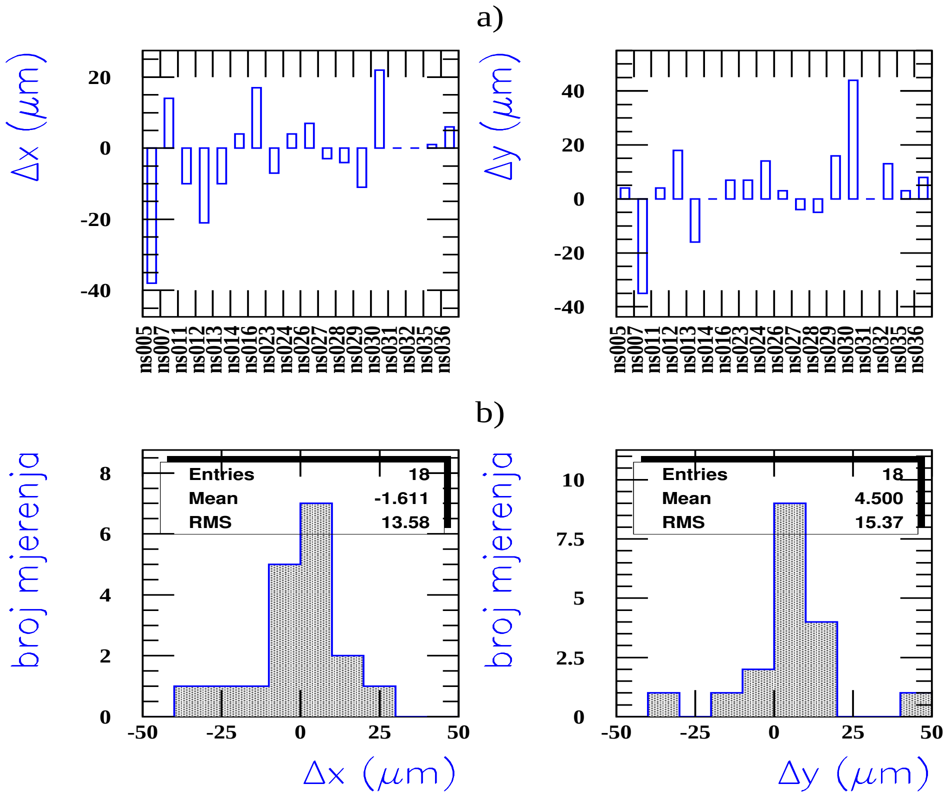
Tablica 6.4: Mjerenje relativnih odmaka aktivne senzorske plohe iz nominalnog položaja na metalnom okviru. Navedena su mjerenja za šest različitih udubina na tri platforme, te njihova prosječna vrijednost i pogreška.

senzor → parametar ↓	ns031	ns035	ns023	ns036	ns013	ns014
Δx	0	2	-9	4	11	16
Δy	0	-2	8	-14	-20	-16
p_{1x}	-8.79	-6.55	0.06	-20.56	-15.84	5.57
p_{2x}	-0.4e-3	-0.2e-2	-0.1e-2	-0.2e-2	-0.8e-3	-0.4e-3
p_{3x}	0.5e-3	0.6e-3	0.4e-3	0.2e-3	-0.2e-3	-0.2e-3
p_{4x}	-0.9e-7	-0.8e-7	-0.2e-8	-0.6e-7	0.1e-7	-0.2e-7
p_{5x}	0.4e-7	0.5e-7	0.5e-7	0.7e-8	0.2e-8	0.2e-7
p_{6x}	-0.2e-7	0.3e-8	-0.1e-7	-0.9e-7	0.4e-8	0.6e-7
p_{1y}	27.37	-4.26	-10.28	38.14	-24.89	3.16
p_{2y}	0.5e-3	0.5e-2	0.1e-3	0.1e-3	-0.6e-4	-0.2e-3
p_{3y}	-0.2e-2	-0.2e-2	0.2e-2	-0.9e-3	-0.4e-3	-0.8e-3
p_{4y}	0.8e-7	0.5e-7	-0.5e-7	0.7e-8	0.4e-7	0.6e-7
p_{5y}	-0.6e-8	-0.2e-7	0.7e-8	-0.2e-7	0.2e-7	0.9e-8
p_{6y}	-0.3e-7	-0.3e-6	-0.3e-7	-0.1e-6	-0.2e-7	-0.7e-7

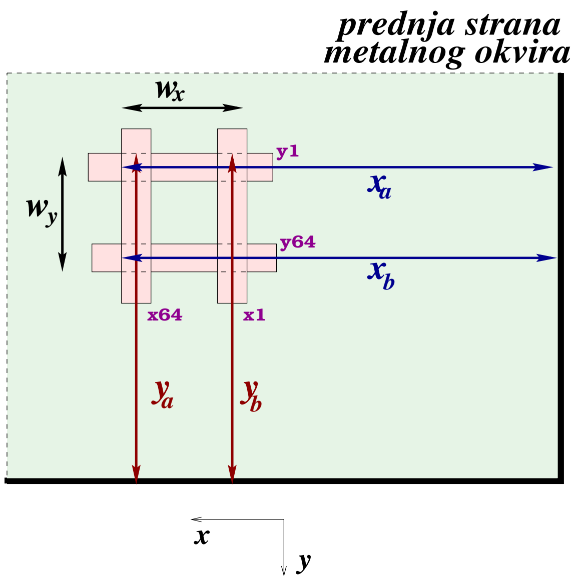
Tablica 6.5: Baždarni parametri senzora ALMY II.

Ekvivalentno je mjerenje izvedeno i za ostale senzore, upotrebom samo jedne udubine platforme. Rezultati su prikazani na slici 6.25.

Mehanički odmak veći je od dizajnom specificirane moći razlučivanja položaja laserskog snopa. Budući da su opažene varijacije u rezultatima mjerenja, ovisno o upotrebljenoj platformi, mikroskopom je izvršeno dodatno mjerenje apsolutnog položaja aktivne plohe na metalnom okviru. Izmjerene udaljenosti naznačene su na slici 6.26.



Slika 6.25: Relativni mehanički odmak aktivne senzorske plohe za 18 senzora, mjeren u odnosu na senzor ns031.



Slika 6.26: Mikroskopom mjerene udaljenosti aktivne plohe senzora u odnosu na referentne plohe metalnog okvira.

Rezultati mjerenja mikroskopom prikazani su u tablici 6.6.

senzor	x_a (mm)	x_b (mm)	y_a (mm)	y_b (mm)	w_x (mm)	w_y (mm)	x_m (mm)	y_m (mm)	Δx (μm)	Δy (μm)
ns031	60.004	60.001	56.497	56.500	19.990	19.992	50.007	46.502	0	0
ns035	59.984	59.982	56.493	56.497	19.994	19.992	49.986	46.499	21	-3
ns023	60.001	60.001	56.504	56.505	19.994	19.991	50.004	46.510	3	8
ns036	60.005	60.000	56.491	56.495	19.993	19.992	50.007	46.497	0	-5
ns013	59.987	59.987	56.490	56.490	19.993	19.993	49.991	46.494	16	-8
ns014	59.989	59.991	56.490	56.486	19.995	19.993	49.993	46.492	14	-10

Tablica 6.6: Rezultati mjerenja mikroskopom apsolutnog položaja aktivne plohe senzora na metalnom okviru.

Iz mjerenja rađenih mikroskopom može se izračunati udaljenost središnje točke aktivne plohe od bočne referentne plohe (x_m), te od osnovice (y_m):

$$x_m = \frac{x_a + x_b}{2} + \frac{w_x}{2} \tag{6.17}$$

$$y_m = \frac{y_a + y_b}{2} + \frac{w_y}{2}. \tag{6.18}$$

$x_{a(b)}$ je udaljenost od vanjskog ruba 64.-te x-elektrode do bočne referentne plohe, $y_{a,b}$ je udaljenost od vanjskog ruba prve y-elektrode do osnovice, a $w_{x(y)}$ je širina između vanjskih rubova prve i posljednje x(y)-elektrode. Mehanički odmak (Δx, Δy) za dani senzor određuje se u odnosu na senzor ns031.

Tablica 6.7 daje usporedbu rezultata dvaju opisanih mjerenja mehaničkih odmaka.

senzor	**laser**		**mikroskop**	
	Δx (μm)	Δy (μm)	Δx (μm)	Δy (μm)
ns031	**0**	**0**	**0**	**0**
ns035	**2**	**-2**	**21**	**-3**
ns023	**-9**	**8**	**3**	**8**
ns036	**4**	**-14**	**0**	**-5**
ns013	**11**	**-20**	**16**	**-8**
ns014	**16**	**-16**	**14**	**-10**

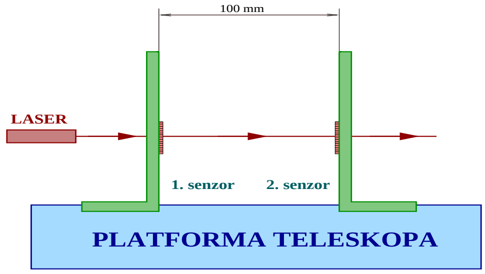
Tablica 6.7: Rezultati dvaju mjerenja (laserom i mikroskopom) mehaničkih odmaka aktivne senzorske plohe od nominalnog položaja na metalnom okviru.

Za y-koordinatu položaja opaža se bolje slaganje rezultata dvaju mjerenja. Moguće objašnjenje je veća površina osnovice kao referentne plohe (u odnosu na znatno manju površinu bočne plohe). Opažene razlike mogu također biti objašnjene samom pogreškom mjerenja, koja u oba slučaja iznosi $\sim$5 μm.

7

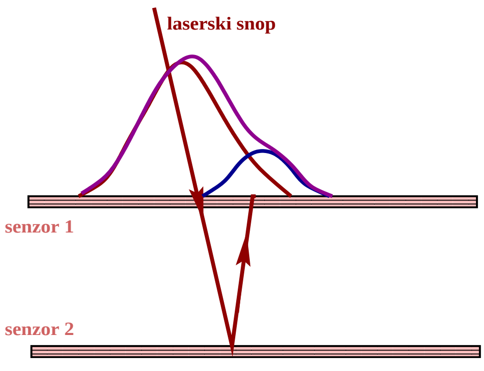
Utjecaj refleksije laserskog snopa

Kao što je spomenuto, primjena senzora ALMY u sustavu za nadgledanje položaja u detektoru ATLAS predviđa upotrebu optičkih teleskopa (vidi sliku 7.1). Oni omogućuju mjerenje smjera laserskog snopa.



Slika 7.1: Pojednostavljeni prikaz optičkog teleskopa ALMY.

U ovoj konfiguraciji javlja se dodatni problem koji treba pobliže proučiti. Naime, dio upadnog laserskog snopa djelomično se reflektira od drugog senzora natrag prema prvome. Mjerenja transmitivnosti impliciraju da protureflektivni sloj ne sprečava refleksiju u potpunosti. Na prvom senzoru se osim Gaussove raspodjele intenziteta upadnog snopa javlja dodatni doprinos reflektiranog snopa (vidi sliku 7.2).



Slika 7.2: Pojednostavljeni prikaz utjecaja djelomične refleksije laserskog snopa u optičkom teleskopu.

Superpozicija ovih dvaju signala uzrokuje pogrešku u mjerenju stvarnog položaja snopa. Proučavanje utjecaja ove pojave opisano je za x-koordinatu, a analogni izrazi vrijede i za y-smjer. Stvarni položaj laserskog snopa ($x_{1stvarni}$) na prvom senzoru može se izmjeriti ako uklonimo drugi senzor iza njega. Sam senzor određuje položaj snopa prilagodbom Gaussove funkcije na mjerenu raspodjelu intenziteta svjetlosti:

$$I_1(x) = I_{10} \cdot e^{-\frac{(x-x_{1stvarni})^2}{2\sigma^2}}, \tag{7.1}$$

gdje su, uz stvarni položaj, parametri prilagodbe još i maksimalni intenzitet snopa I_{10}, te širina Gaussove raspodjele σ.

Nakon što odredimo stvarni položaj, postavljamo i drugi senzor u optički teleskop. Doprinos reflektirane svjetlosti sada se superponira na prvobitnu raspodjelu intenziteta, što rezultira novom raspodjelom $I_{1T}(x)$. Prilagodbom Gaussove funkcije na I_{1T},

$$I_{1T}(x) = I_{10T} \cdot e^{-\frac{(x-x_1)^2}{2\sigma_T^2}}, \tag{7.2}$$

dobiva se položaj snopa x_1 koji može biti bitno različit od stvarnog položaja $x_{1stvarni}$. (Za mali koeficijent refleksije je $\sigma_T \approx \sigma$.)

Položaj snopa mjeren drugim senzorom (x_2) dobiva se prilagodbom Gaussove funkcije

$$I_2(x) = I_{20} \cdot e^{-\frac{(x-x_2)^2}{2\sigma^2}}. \tag{7.3}$$

Pritom pretpostavljamo istu širinu snopa kao i za prvi senzor, tj $\sigma_2 = \sigma$. Izmjereni položaj je ovdje jednak stvarnom, jer na taj senzor ne upada reflektirana svjetlost.

Budući da se u stvarnom sustavu za nadzor položaja ne mogu izbjeći opisani efekti refleksije laserskog snopa, potrebno je razviti postupak korekcije kojim se određuje stvarni položaj laserskog snopa. Da bi taj postupak bio efikasan, potrebno je točno poznavanje položaja x_r reflektirane svjetlosti na prvom senzoru. Taj je položaj približno zadan izrazom

$$x_r \approx 2x_2 - x_1 + x_{off}, \tag{7.4}$$

gdje je x_{off} x-komponenta relativnog mehaničkog odmaka prvog senzora u odnosu na drugi. Ovaj je izraz izveden uz pretpostavku da su plohe dvaju senzora međusobno paralelne, što je jedna od značajki samog teleskopa.

Pretpostavimo da je snop reflektirane svjetlosti opisan Gaussovom raspodjelom

$$I_r(x) = I_{r0} \cdot e^{-\frac{(x-x_r)^2}{2\sigma_r^2}}, \tag{7.5}$$

te da je širina tog snopa jednaka širini upadnog snopa ($\sigma_r = \sigma$). Maksimalni intenzitet reflektirane svjetlosti I_{r0} može se izračunati ako je poznat koeficijent refleksije r_x za drugi senzor:

$$I_{r0} = r_x \cdot I_{20} \tag{7.6}$$

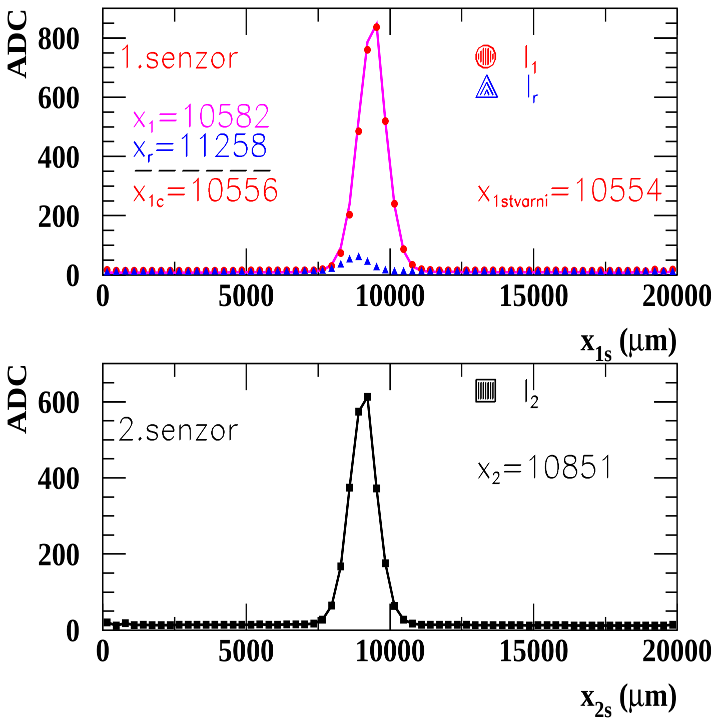
Stvarni položaj laserskog snopa dobiva se tako da se najprije od raspodjele $I_{1T}(x)$ izmjerene prvim senzorom oduzme intenzitet reflektirane svjetlosti $I_r(x)$, i tek tada vrši prilagodba Gaussove funkcije na raspodjelu $I_{1c}(x)$:

$$I_{1c} = I_{1T}(x) - I_r(x) = I_{10c} \cdot e^{-\frac{(x-x_{1c})^2}{2\sigma^2}}. \tag{7.7}$$

Ako je korekcija efikasna, korigirani položaj x_{1c} mora biti jednak stvarnom položaju $x_{1stvarni}$.

Da bi se ispitala efikasnost korekcija izvršeno je sljedeće mjerenje. Najprije je izravno izmjerena raspodjela intenziteta $I_1(x)$ laserske svjetlosti na prvom senzoru, kad iza njega nije postavljen drugi senzor. Očitava se položaj $x_{1stvarni}$.

Potom se na platformu optičkog teleskopa montira i drugi senzor, te se mjere raspodjele $I_{1T}(x)$ i $I_2(x)$. Očitavaju se položaji x_1 i x_2. Na x_1 se primjenjuje prethodno opisana korekcija (jer se stvarni položaj za prvi senzor u optičkom teleskopu ne može mjeriti izravno), te se dobiva x_{1c}.



Slika 7.3: Efikasnost korekcija doprinosa reflektirane svjetlosti. Prikazane su raspodjele intenziteta I_1, I_r i I_2. Naznačen je i položaj laserskog snopa prije i nakon primjene korekcije. $x_{1s(2s)}$ su koordinate položaja na površini senzora.

Usporedba izravnog mjerenja ($x_{1stvarni}$) i onog dobivenog korekcijom (x_{1c}) govori o efikasnosti korekcije. Usporedbom se također može izdvojiti i raspodjela reflektirane svjetlosti $I_r(x)=I_{1T}-I_1$.

Slika 7.3 prikazuje rezultat opisanog mjerenja. Mjerenje je ponovljeno za devet različitih položaja (a ujedno i kutova upada) laserskog snopa. Tako je ispitana ovisnost koeficijenta refleksije r_x o položaju na površini senzora. Udaljenost između položaja reflektiranog i upadnog snopa ovisit će o kutu upada laserskog snopa, pa je efikasnost korekcija ispitana i u ovisnosti o toj udaljenosti. Tablica 7.1 prikazuje rezultate ovih devet mjerenja.

	r_x	x_1 (μm)	x_r (μm)	$x_{1stvarni}$ (μm)	x_{1c} (μm)	x_1-$x_{1stvarni}$ (μm)	$x_{1stvarni}$-x_{1c} (μm)
1.	**8.1%**	**6828**	**3490**	**6829**	**6828**	**-1**	**1**
2.	**9.0%**	**7821**	**5539**	**7823**	**7822**	**-1**	**1**
3.	**8.2%**	**8363**	**6649**	**8367**	**8367**	**-4**	**0**
4.	**7.9%**	**8829**	**7661**	**8844**	**8846**	**-15**	**-2**
5.	**8.1%**	**9797**	**9664**	**9804**	**9804**	**-7**	**0**
6.	**8.9%**	**10582**	**11258**	**10554**	**10556**	**28**	**-2**
7.	**7.8%**	**9379**	**8830**	**9402**	**9403**	**-23**	**-1**
8.	**9.2%**	**11361**	**12863**	**11353**	**11353**	**8**	**0**
9.	**8.9%**	**11737**	**13673**	**11735**	**11735**	**2**	**0**

Tablica 7.1: Rezultati ispitivanja efikasnosti korekcije utjecaja reflektirane svjetlosti na mjerenje položaja laserskog snopa.

U postupku korekcije upotrebljen je prosječni koeficijent refleksije od 8.5%. Pogreška od ±1% ne utječe bitno na efikasnost korekcija. Primjenom korekcija položaj laserskog snopa može se odrediti s preciznošću

$$|x_{1stvarni} - x_{1c}| = 2\ \mu m.$$

Bez korekcija odstupanje od stvarnog položaja iznosi i do

$$|x_1 - x_{1stvarni}| \approx 30\ \mu m.$$

Treba spomenuti da je u toku razvoj novog optičkog teleskopa u kojem plohe dvaju senzora nisu međusobno paralelne, već tvore kut koji je dovoljno velik da reflektirana svjetlost ne pada na aktivnu površinu. No, zasad je nužna primjena opisanih korekcija koje su implementirane u računalni program za očitavanje položaja snopa.

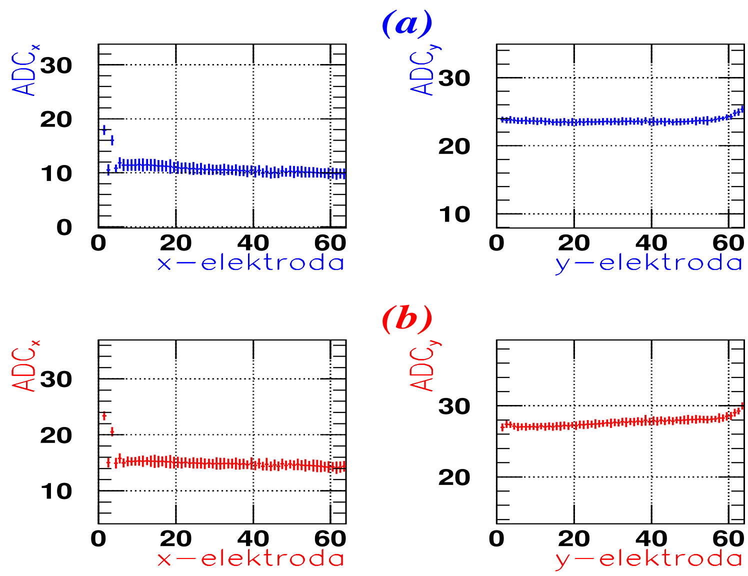
8

Senzori u radnom okruženju

8.1 Senzori u osvijetljenom okruženju

Aktivna površina senzora vrlo je osjetljiva na vidljivu svjetlost, tako da čak i neznatno osvjetljenje daje znatan pozadinski signal pri mjerenju intenziteta laserskog snopa. Budući da je u samom detektoru čestica teško ostvariti potpuno mračno okruženje (npr. prilikom održavanja), svaki senzor posjeduje posebno kućište koje ga štiti od okolne svjetlost. Rad senzora s takvim kućištem ispitan je u osvijetljenom i u mračnom okruženju.

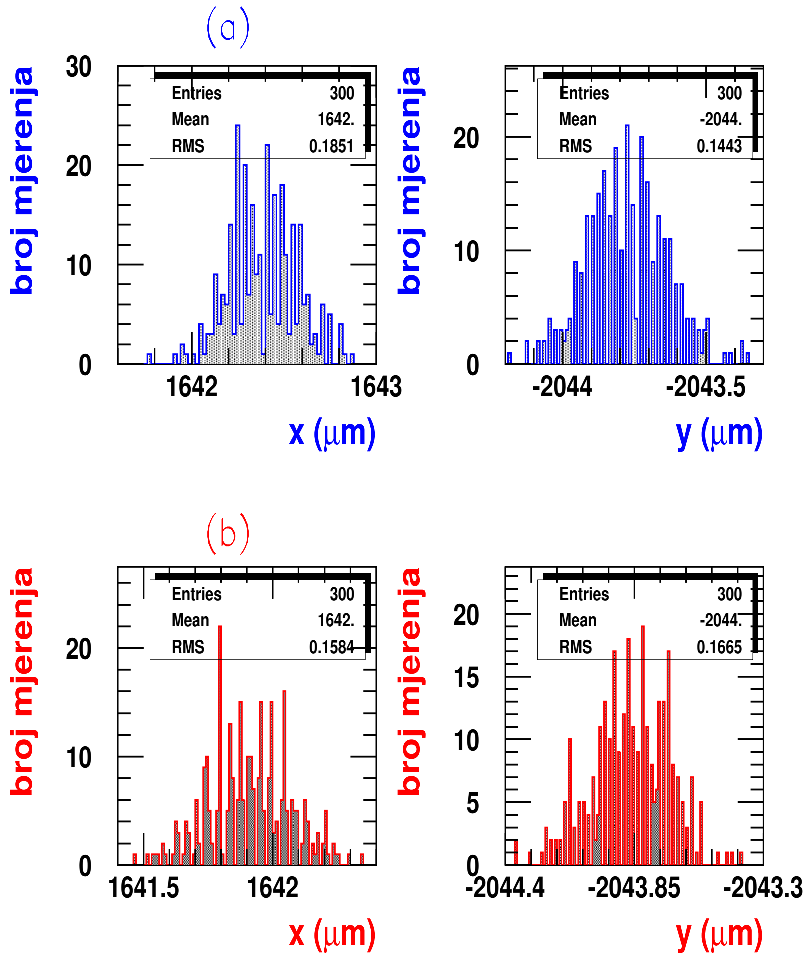
Najprije je ispitan sam pozadinski signal. Laserska svjetlost ne osvjetljava senzor. U mračnom okruženju jedini je izvor pozadinskog signala elektronički šum (tipični iznosi su 10-50 ADC jedinica). Rad senzora je pouzdan samo ako u osvijetljenom okruženju ne dolazi do bitne promjene pozadinskog signala. Slika 8.1 prikazuje rezultate ovog ispitivanja.



Slika 8.1: Pozadinski signal (izražen u ADC jedinicama) u ovisnosti o rednom broju elektrode senzora, mjeren u (a) mračnom i (b) osvijetljenom okruženju.

Raspodjela pozadinskog signala (u ovisnosti o rednom broju elektrode) ostaje jednolika u oba slučaja. Intenzitet je nešto viši ($\sim$ 5 ADC jedinica) u osvijetljenom okruženju, pa se ne očekuje bitna promjena u radu senzora.

Na sličan način ispitan je i izravan utjecaj na točnost mjerenja položaja laserskog snopa. Položaj snopa izmjeren je 300 puta uzastopce u mračnom i u osvijetljenom okruženju. Slika 8.2 prikazuje raspodjelu izmjerenih položaja. Nije opažena promjena u mjerenom položaju, kao što se i očekuje na temelju opaženih raspodjela za pozadinski signal.



Slika 8.2: Raspodjele dobivene mjerenjem položaja laserskog snopa u (a) mračnom i (b) osvijetljenom okruženju.

Isti rezultati mjerenja dobiveni su za sve ispitane senzore. Može se zaključiti da osvijetljenost radnog okruženja ne utječe na preciznost senzora zaštićenih kućištem.

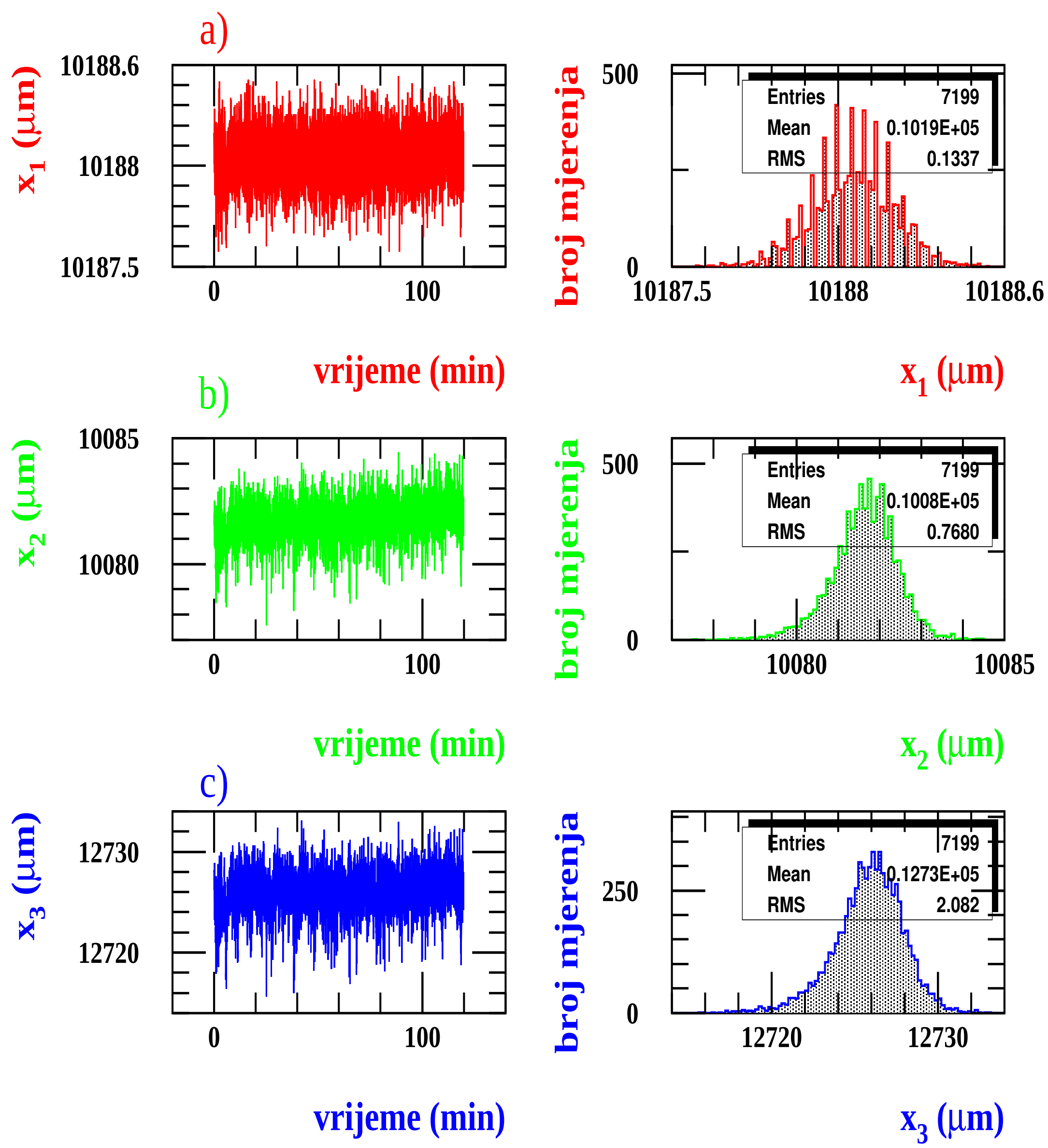
8.2 Zaštita putanje laserskog snopa

Zanimljivo pitanje, o kojem ovisi geometrijski raspored potpornih struktura sustava za nadzor položaja u detektoru ATLAS, jest pitanje zaštite laserske putanje. Naime, uslijed zračnih strujanja i promjene okolne temperature, duž putanje laserskog snopa dolazi do varijacija gustoće zraka (tj. indeksa loma svjetlosti). Ako uslijed toga položaj laserskog snopa postaje suviše nestabilan, njegovu je putanju potrebno zašititi aluminijskim cijevima dobre termalne vodljivosti. Cijevi moraju prianjati uz samo kućište senzora, kako bi se izbjegla strujanja na njihovim rubovima.

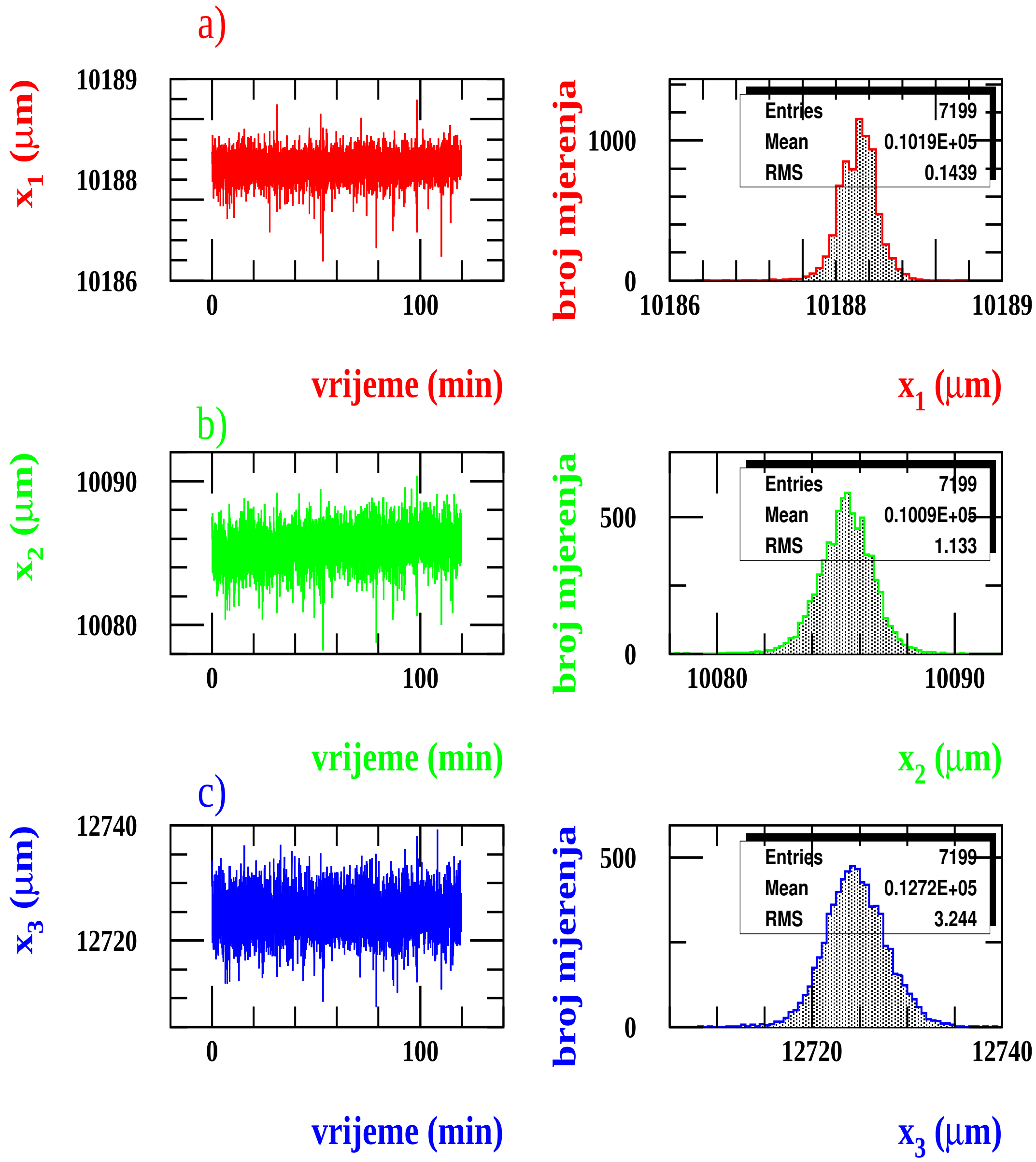
Učinkovitost zaštitnih cijevi ispitana je postavljenjem tri senzora ALMY II duž putanje laserskog snopa. Senzori su postavljeni na udaljenostima d_1=0.44 m, d_2=1.38 m i d_3=3.22 m od laserske diode. U prvom mjerenju putanja snopa zaštićena je aluminijskim cijevima, a drugo je izvedeno bez upotrebe cijevi. Budući da u laboratoriju gdje je vršeno mjerenje nema znatnih zračnih strujanja, ova mjerenja omogućuju ispitivanje utjecaja temperaturnih gradijenata.

Rezultati mjerenja (za x-koordinatu položaja laserskog snopa) prikazani su na slikama 8.3 i 8.4. Slični rezultati dobiveni su i za y-koordinatu. Položaj je mjeren u vremenskom periodu od dva sata. RMS vrijednosti raspodjela mjerenih položaja laserskog snopa ne ovise bitno o tome je li putanja snopa zaštićena ili ne, pa se može zaključiti da temperaturni gradijenti vrlo malo utječu na rad senzora. No, ovdje je potreban oprez - utjecaj temperaturnih gradijenata treba dodatno ispitati u stvarnom detektorskom okruženju. Tamo će udaljenost između pojedinih senzora biti nešto veća (4-5 m), a i temperaturni gradijenti mogli bi biti veći od onih prisutnih u laboratoriju.

Ovim mjerenjima demonstrirana je odlična stabilnost laserskog snopa tijekom dva sta. To je ujedno i preduvjet za točnost ispitivanja senzora, jer jedno ispitivanje traje $\sim$45 min.



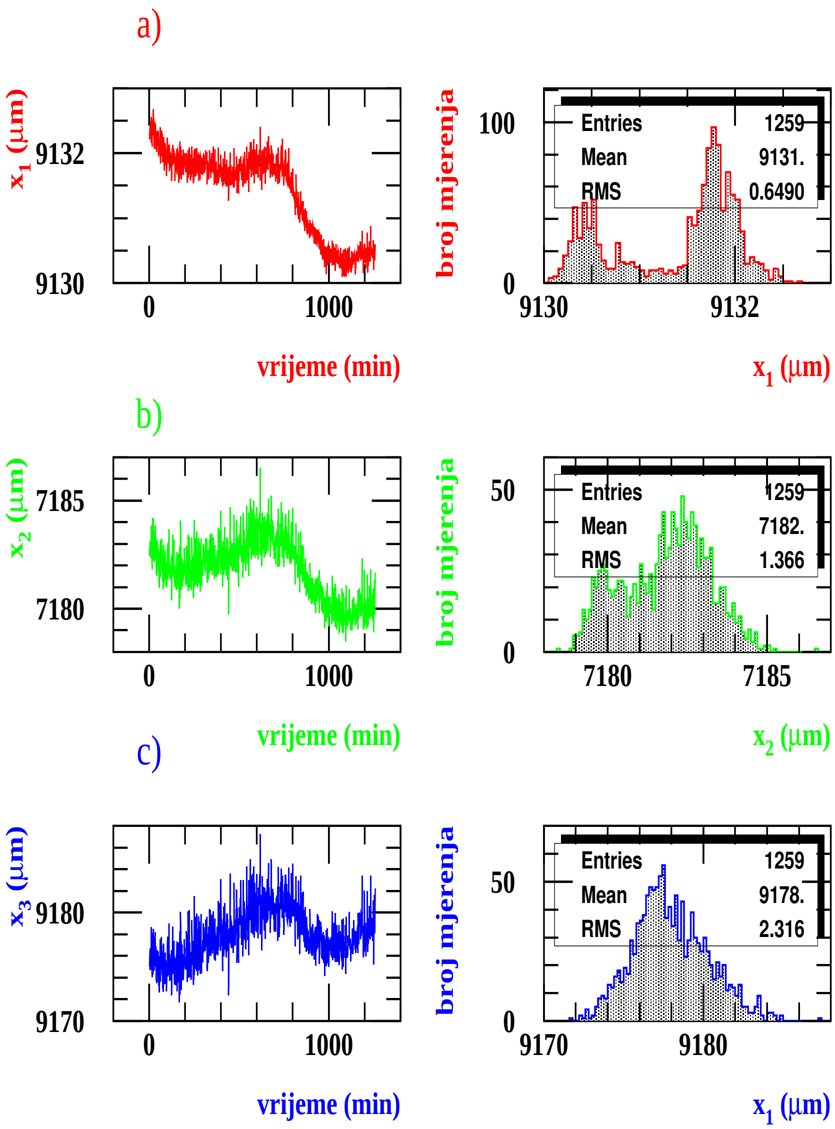
Slika 8.3: Mjerenje stabilnosti položaja laserskog snopa na tri različite udaljenosti od laserske diode: (a) d_1=0.44 m, (b) d_2=1.38 m i (c) d_3=3.22 m. Putanja laserskog snopa je tijekom mjerenja *zaštićena* aluminijskim cijevima.



Slika 8.4: Mjerenje stabilnosti položaja laserskog snopa na tri različite udaljenosti od laserske diode: (a) d_1=0.44 m, (b) d_2=1.38 m i (c) d_3=3.22 m. Putanja laserskog snopa tijekom mjerenja *nije zaštićena* aluminijskim cijevima.

8.3 Dugoročna stabilnost položaja laserskog snopa

Osim prethodno opisane kratkoročne stabilnosti položaja laserskog snopa, također je testirana i dugoročna stabilnost, tijekom 24-satnog mjerenja. Rezultati su prikazani na slici 8.5. Čak i na velikim udaljenostima od laserske diode položaj snopa ostaje stabilan tijekom cijelog dana (RMS raspodjele položaja mjerene najudaljenijim senzorom je manji od 3 μm). Vidljiva je promjena položaja koja nije statističke prirode. Ona se javlja zbog promjene temperature tijekom noći.



Slika 8.5: Mjerenje dugoročne stabilnosti položaja laserskog snopa na tri različite udaljenosti od laserske diode: (a) d_1=0.44 m, (b) d_2=1.38 m i (c) d_3=3.22 m. Putanja laserskog snopa tijekom mjerenja nije zaštićena aluminijskim cijevima.

8.4 Odstupanje laserske putanje od pravca

Čak i ako putanja laserskog snopa tijekom vremena odmiče od početne, to neće utjecati na nadzor položaja u sustavu detektora ATLAS, pod uvjetom da se putanja čitavo vrijeme može opisati pravcem. Ispitivanje zakrivljenosti putanje bit će opisano u jednom od sljedećih poglavlja.

9

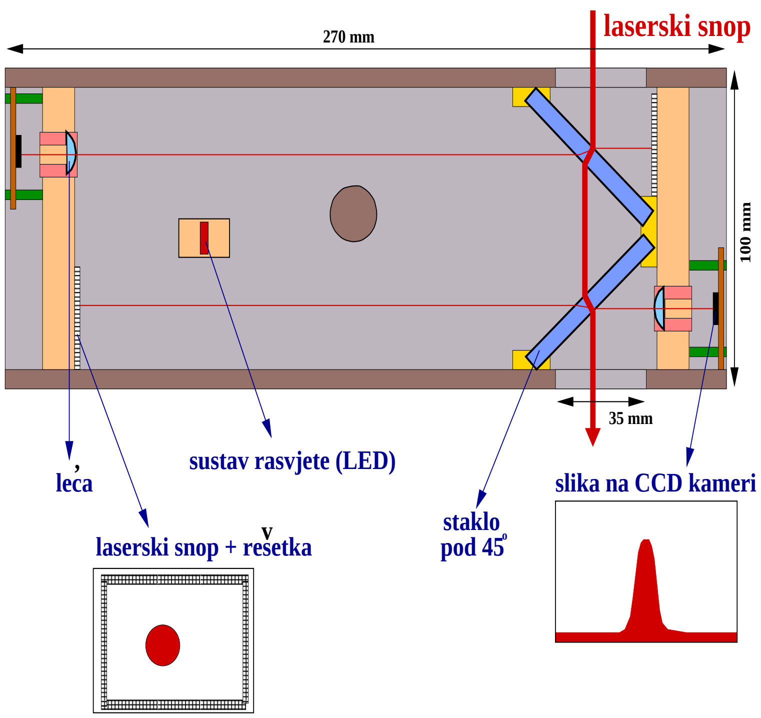
Učinkovitost polarnih monitora

9.1 Ispitivanje senzorskih kandidata za primjenu u polarnom sustavu

Za nadzor položaja mionskih komora u end-cap području detektora ATLAS predložena su tri tipa senzora, skraćenih naziva STAMP, BCAM i ALMY.

a) STAMP (Saclay Telescope for the Alignment of Many Points)

Senzori STAMP razvijeni su u Centre d'Etudes de Saclay, Gif-Sur-Yvette u Francuskoj. Ovaj sustav čine CCD kamere koje mjere položaj laserskog snopa. Slika 9.1 pojednostavljeno prikazuje optički teleskop STAMP.



Slika 9.1: Pojednostavljeni prikaz optičkog teleskopa STAMP.

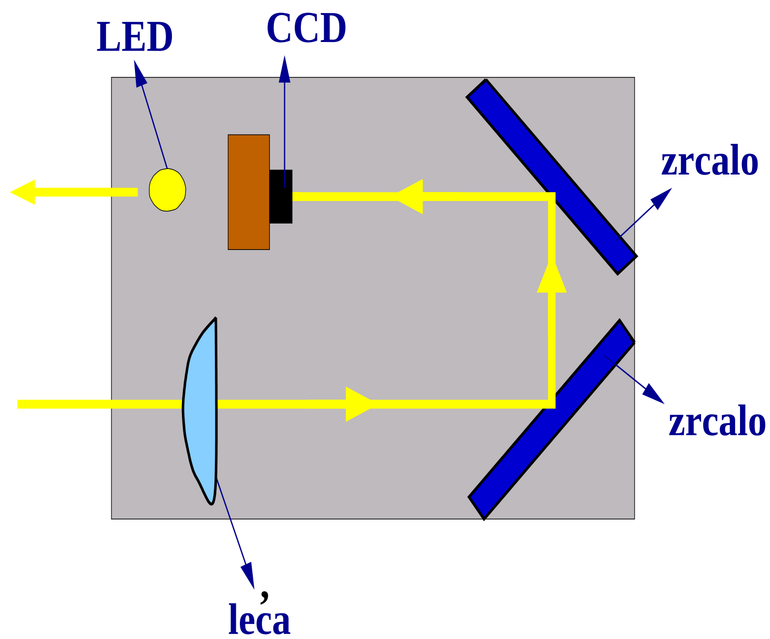
Teleskop se sastoji od dvije ploče nagnute pod kutom od 45^o u odnosu na dvije CCD kamere. Laserski snop prolazi kroz staklo, a svaka CCD kamera bilježi sliku snopa na rešetki (udaljenoj oko 250 mm od kamere). Rešetke osvijetljene LED (Light Emitting Diode) izvorom imaju ulogu referentnog sustava u odnosu na koji se mjeri položaj laserskog snopa.

Teleskop ima relativno veliku aktivnu površinu, ∼40 μm u x- i y-smjeru. U laboratorijskim ispitivanjima dobivena je moć razlučivanja položaja $\sigma_{x,y} \approx$5 μm, te kutna razlučivost od $\sigma_\theta \approx$30-40 μrad.

Na referentne stupove u sustavu za nadzor položaja svaki teleskop se učvršćuje u tri potporne točke, što omogućuje precizno mjerenje položaja teleskopa u globalnom sustavu detektora ATLAS.

b) BCAM (Boston CCD Angle Monitors)

Senzori BCAM [32] razvijeni su na Brandeis Univerzitetu u Bostonu. Slično kao i sustav STAMP, i ovaj se sustav zasniva na CCD tehnologiji. Umjesto laserskog snopa ovdje kao izvor svjetlosti služi LED dioda. Pojednostavljeni prikaz senzora BCAM dan je na slici 9.2.



Slika 9.2: Pojednostavljeni prikaz optičkog senzora BCAM.

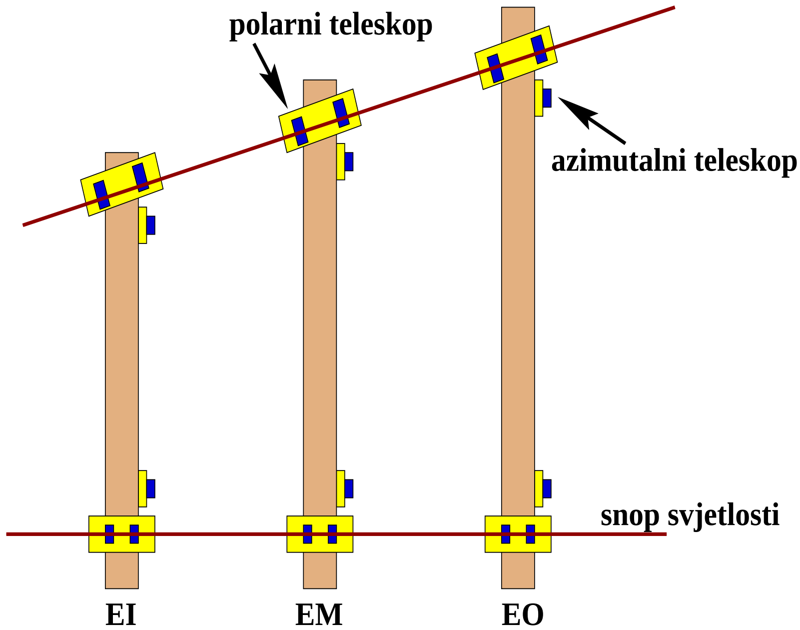
Svjetlost LED diode jednog senzora upada na leću drugog senzora (i obratno), te se zrcalima vodi do CCD kamere tog senzora. CCD kamera bilježi položaj snopa svjetlosti i tako mjeri relativne pomake jednog senzora u odnosu na drugi.

Laboratorijska ispitivanja pokazala su moć rezolucije $\sigma_{x,y} \approx$0.2 μm, a kutna razlučivost iznosi $\sigma_\theta \approx \frac{0.2\ \mu m}{f}$, gdje je f žarišna daljina leće. Za instalaciju na referentne stupove i ovdje se primjenjuje sustav s tri potporne točke.

c) ALMY (ALignierung des MYonspektrometers)

Opis senzora ALMY, te rezultati njihovog laboratorijskog ispitivanja detaljno su razrađeni u prethodnim poglavljima.

Navedeni rezultati laboratorijskih ispitivanja senzorskih kandidata potječu iz matičnih instituta na kojima su senzori razvijani. Kako za primjenu u detektoru ATLAS treba odabrati jedan od ova tri kandidata, zamišljeno je dodatno ispitivanje koje će omogućiti izravnu usporedbu triju sustava (u daljnjem tekstu *ispit učinkovitosti*). Ispitivanje je zamišljeno tako da eksperimentalna postava što dosljednije simulira stvarnu postavu u sustavu detektora ATLAS. Slika 9.3 prikazuje geometrijski raspored optičkih teleskopa u polarnom podsustavu, koji je sličan za sva tri navedena kandidata.

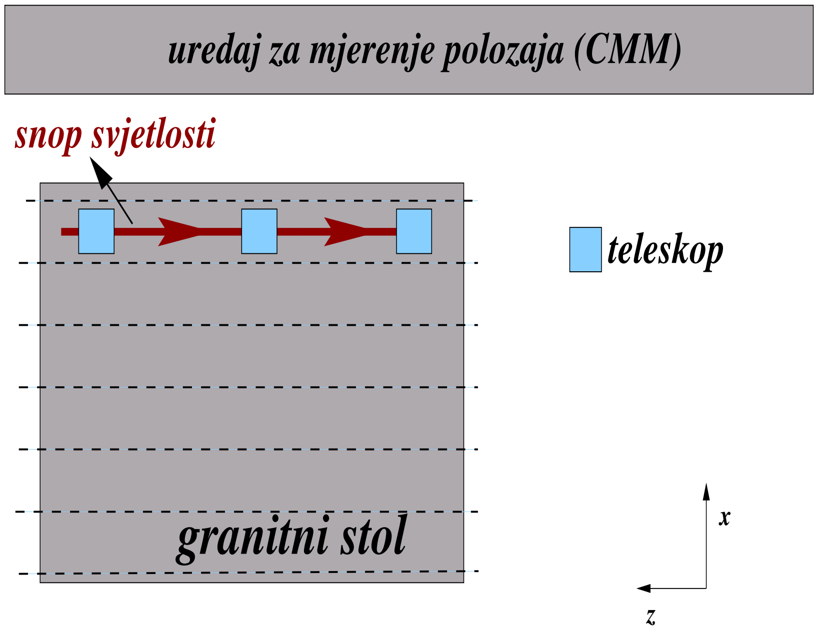


Slika 9.3: Geometrijski raspored optičkih teleskopa u polarnom sustavu za nadzor položaja u detektoru ATLAS.

Podsustav čine tri referentna stupa. Svaki stup nosi dva polarna i dva azimutalna teleskopa. Da bi preciznost korekcije sagite mionske putanje u svakom od projekcijskih tornjeva bila unutar postavljenih zahtjeva, svaki polarni monitor mora mjeriti prividnu sagitu s preciznošću boljom od 20 μm. Također mora biti ostvarena kutna razlučivost (tj. preciznost u mjerenju smjera svjetlosnog snopa) bolja od 50 μrad. Ispit učinkovitosti usredotočen je na mjerenje ovih značajki jednog polarnog monitora, za sva tri predložena senzorska kandidata. Sva mjerenja izvedena su na Institutu za fiziku Albert-Ludwig-Univerziteta u Freiburgu (tj. u suradnji s "nepristranim promatračem".)

Učinkovitost polarnog monitora ispituje se sustavom prikazanim na slici 9.4. Naredna razmatranja usredotočit će se na ispitivanje sustava ALMY.

Tri optička teleskopa (ispitivanog kandidata) učvršćena su na vrlo glatku površinu granitnog stola. Laserski snop prolazi kroz svih šest senzora koji mjere njegov položaj. Položaj senzora (u globalnom koordinatnom sustavu) mjeri se preciznim uređajem za trodimenzionalno mjerenje položaja mehaničkih komponenti (**C**oordinate **M**easuring **M**achine, CMM). Preciznost CMM-uređaja je za male udaljenosti $\sim$5 μm.



Slika 9.4: Postava eksperimentalnog sustava za ispit učinkovitosti polarnog monitora. Pogled iz ptičje perspektive.

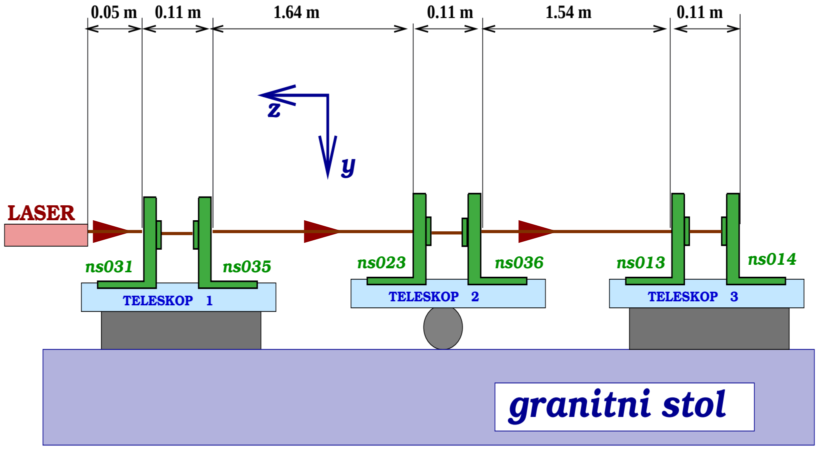
Usporedbom lokalnog mjerenja položaja laserskog snopa na površini senzora, te globalnih koordinata senzora (dobivenim CMM-uređajem) može se odrediti preciznost polarnog monitora u mjerenju sagite, kao i njegova kutna razlučivost. Sagita je definirana odstupanjem srednjeg teleskopa od pravca koji prolazi kroz dva vanjska teleskopa. Kutna razlučivost teleskopa određena je odstupanjem dvaju vanjskih teleskopa od pravca koji prolazi kroz dva senzora srednjeg teleskopa.

Dimenzije granitnog stola i doseg CMM-uređaja postavljaju ograničenje na maksimalnu udaljenost dvaju vanjskih teleskopa (približno 4 m za sva tri senzorska kandidata). Opisanim *kratkodosežnim ispitom* određuje se apsolutna preciznost polarnog monitora.

Budući da će u detektoru ATLAS dva vanjska teleskopa biti razmaknuta $\sim$15 m, izvršeno je i nekoliko dodatnih *dugodosežnih mjerenja* (putanja svjetlosti duga je $\sim$14 m). CMM-uređaj nema tako velik doseg, pa u ovom slučaju nije poznat apsolutni položaj senzora. Ispituje se preciznost u mjerenju relativnih pomaka, te stabilnost i zakrivljenost laserskog snopa.

9.2 Kratkodosežni ispit učinkovitosti

Slika 9.5 daje pojednostavljeni prikaz eksperimentalne postave za kratkodosežni ispit optičkog sustava ALMY.



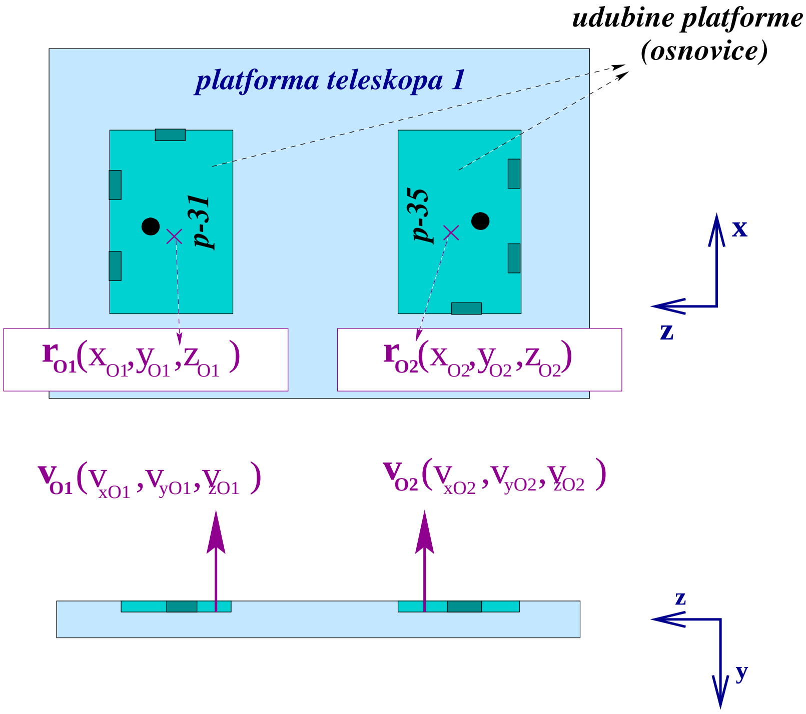
Slika 9.5: Postav eksperimentalnog sustava za kratkodosežni ispit polarnog monitora ALMY.

Dva vanjska teleskopa postavljena su na nepomične platforme učvršćene na granitni stol. Srednji teleskop nalazi se na pomičnoj platformi, s mogućnošću rotacije oko x- i y-osi. Nakon što je platforma srednjeg teleskopa zarotirana u željeni položaj, ona se također učvršćuje tako da senzori tijekom mjerenja ostaju nepomični.

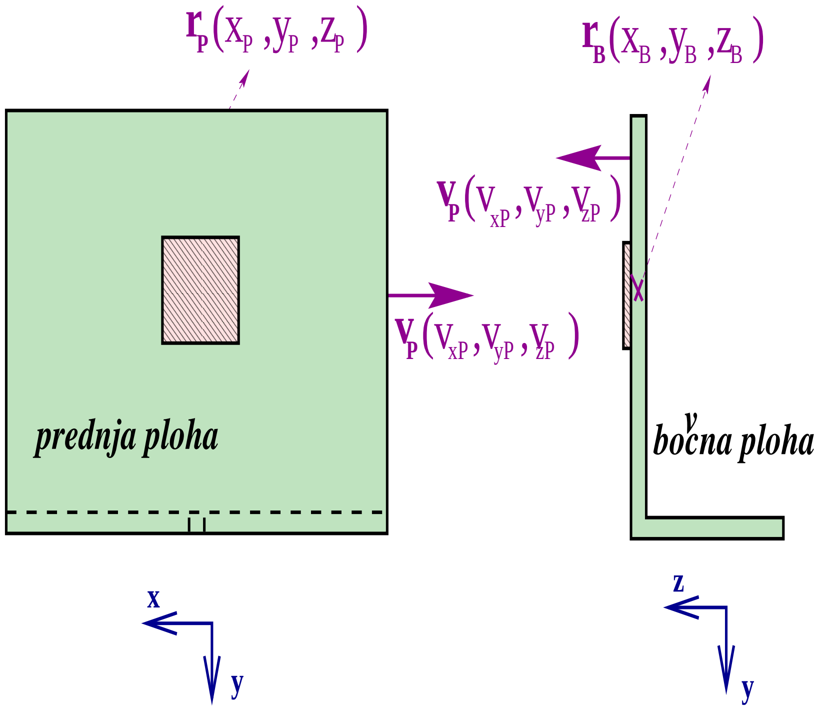
Položaj senzora u globalnom koordinatnom sustavu određuje se CMM-uređajem. Mjere se koordinate određenog broja točaka na prednjoj i bočnoj referentnoj plohi metalnog okvira senzora, te na plohi precizno izrađene udubine na platformi teleskopa (ploha osnovice, u koju je učvršćen senzor). Na plohi osnovice mjeri se položaj 24 točke, a srednja vrijednost mjerenja određuje položaj osnovice - $\mathbf{r}_O$=($\mathbf{x}_O$, $\mathbf{y}_O$, $\mathbf{z}_O$). Prilagodbom jednadžbe ravnine na mjerene točke dobiva se i normalni vektor te plohe, $\mathbf{v}_O$=($\mathbf{v}_{xO}$, $\mathbf{v}_{yO}$,$\mathbf{v}_{zO}$). Ove su veličine naznačene na slici 9.6.

Slično, za prednju plohu senzora mjere se veličine $\mathbf{r}_P$ i $\mathbf{v}_P$, a za bočnu plohu $\mathbf{r}_B$ i $\mathbf{v}_B$ (vidi sliku 9.7). Ti su vektori rekonstruirani mjerenjem položaja za 8 točaka plohe. Zbog manjeg broja točaka pogreška mjerenja normalnog vektora bit će nešto veća nego u prethodnom slučaju.

Na temelju dobivenih koordinata može se rekonstruirati položaj središnje točke aktivne plohe senzora u odnosu na koordinatni sustav CMM-uređaja (globalni koordinatni sustav). U lokalnom koordinatnom sustavu senzora ova točka ima koordinate (x_{lok}=0, y_{lok}=0). Njene nominalne udaljenosti od referentnih ploha senzora navedene su u jednom od prethodnih poglavlja. One se upotrebljavaju pri transformaciji iz lokalnog u globalni koordinatni sustav. Aktivne plohe senzora postavljenih duž putanje laserskog snopa općenito nisu međusobno paralelne (paralelnost vrijedi samo za par senzora na teleskopu). Relativni kut aktivne plohe u odnosu na granitni stol može se rekonstruirati na temelju izmjerenih normalnih vektora. Taj je kut uzet u obzir pri transformaciji iz jednog sustava u drugi.



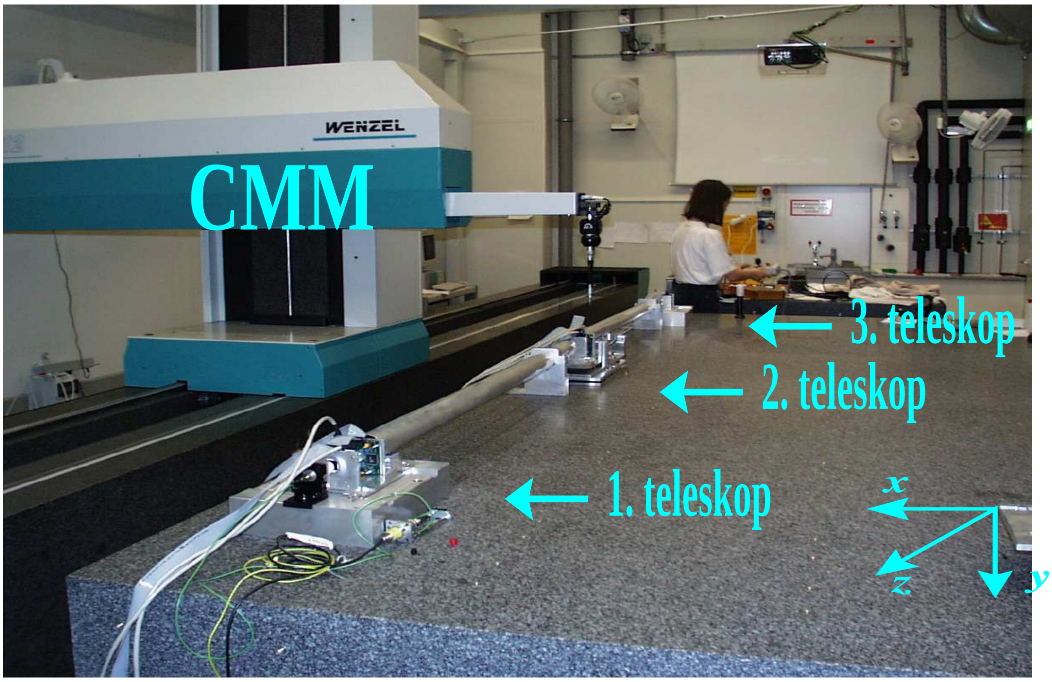
Slika 9.6: Koordinate položaja i normalni vektori dviju osnovica optičkog teleskopa ALMY, izmjerene CMM-uređajem.



Slika 9.7: Koordinate položaja i normalni vektori dviju referentnih ploha senzora ALMY, izmjerene CMM-uređajem.

9.2.1 Program kratkodosežnog ispita

Kratkodosežni ispit (vidi sliku 9.8) sastoji se od osam mjerenja. U svim mjerenjima položaj dvaju vanjskih teleskopa ostaje nepromijenjen. Srednji teleskop (vidi sliku 6.14) zarotiran je u svakom mjerenju oko x- i y-osi u novi položaj.



Slika 9.8: Fotografija eksperimentalne postave za kratkodosežni ispit polarnog monitora ALMY.

U tablici 9.1 navedeni su za svako mjerenje kutovi rotacije srednjeg teleskopa (α_x, α_y).

Mjerenje #	α_x^{tel2} (mrad)	α_y^{tel2} (mrad)
1.	+30	+35
2.	+30	-25
3.	-25	-25
4.	-20	+20
5.	0	-10
6.	0	-10
7.	0	+10
8.	0	-20

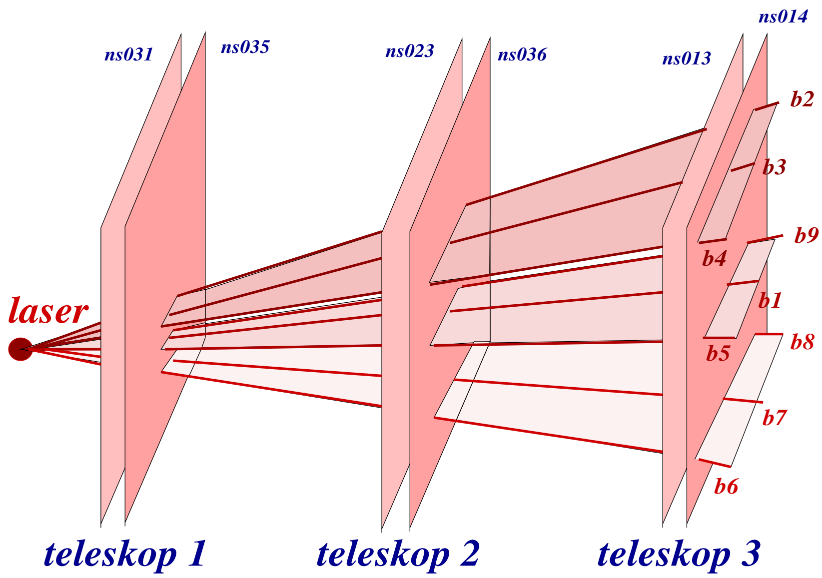
Tablica 9.1: Kutovi rotacije srednjeg teleskopa u odnosu na laserski snop, za svako od osam kratkodosežnih mjerenja

Prva su četiri mjerenja izvedena za veliki kut rotacije u odnosu na laserski snop (približno dva puta veći od maksimalnog očekivanog u detektoru

ATLAS). Time je ispitan rad senzora u graničnim uvjetima. Peto i šesto mjerenje izvedeno je bez promjene položaja srednjeg teleskopa, tako da se usporedbom dobiva informacija o reproducibilnosti mjerenja. Za posljednja dva mjerenja samo je kut rotacije oko y-osi velik, dok je onaj oko x-osi vrlo malen.

Svako mjerenje može se podijeliti u dva dijela. Prvi dio čini **mjerenje CMM-uređajem**, kojim se dobivaju veličine $\mathbf{r}_O(\mathrm{i}_m, \mathrm{i}_s)$, $\mathbf{v}_O(\mathrm{i}_m, \mathrm{i}_s)$, $\mathbf{r}_P(\mathrm{i}_m, \mathrm{i}_s)$, $\mathbf{v}_P(\mathrm{i}_m, \mathrm{i}_s)$, $\mathbf{r}_B(\mathrm{i}_m, \mathrm{i}_s)$ i $\mathbf{v}_B(\mathrm{i}_m, \mathrm{i}_s)$. i_m(=1,..,8) označava redni broj mjerenja, a i_s(=1,..,6) je redni broj senzora (od najbližeg do najudaljenijeg u odnosu na lasersku diodu).

Drugi dio je **mjerenje položaja laserskog snopa**. Laserska dioda spojena je na kolimator kojim se može mijenjati kut upada snopa na senzor. Putanja snopa prolazi kroz svih šest senzora koji mjere položaj snopa (u lokalnim senzorskim koordinatama). U svakom od osam mjerenja promatrano je devet različitih orijentacija laserskog snopa (b1 do b9, vidi sliku 9.9). Na taj je način ispitana cijela površina senzora.



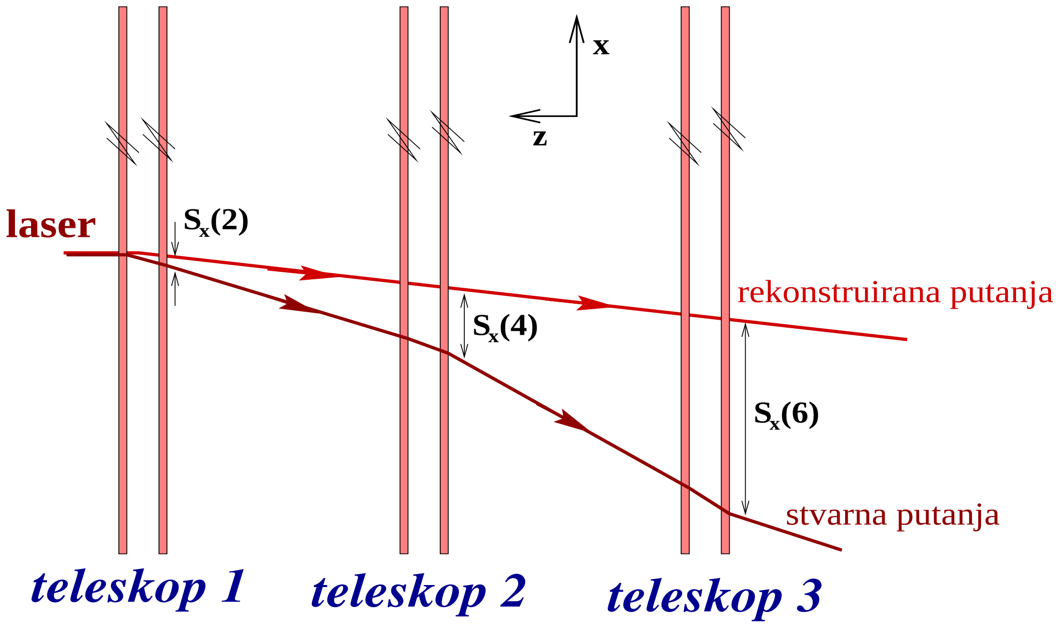
Slika 9.9: Devet orijentacija laserskog snopa (b1 do b9), promatranih u kratkodosežnom mjerenju.

Spomenuto je da refleksija laserskog snopa utječe na točnost mjerenja položaja laserskog snopa. Korekcije utjecaja refleksije implementirane su u računalni program za očitavanje položaja. Da bi se dodatno ispitala učinkovitost ovih i baždarnih korekcija, određivanje položaja izvedeno je na tri načina:

(i) U prvom slučaju *nisu primijenjene korekcije utjecaja refleksije*. Izmjerene koordinate položaja su $x_{lok}(i_m, i_s, i_b)$ i $y_{lok}(i_m, i_s, i_b)$. i_m(=1,..,8) je redni broj mjerenja, i_s(=1,..,6) je redni broj senzora (kao kod mjerenja CMM-uređajem), a i_b(=1,..,9) označuje pojedinu orijentaciju laserskog snopa.

(ii) U drugom slučaju *primijenjene* su *korekcije utjecaja refleksije*. Mjere se koordinate $\tilde{x}_{lok}(i_m, i_s, i_b)$ i $\tilde{y}_{lok}(i_m, i_s, i_b)$.

(iii) Sagite i kutna razlučivost mjere se pod pretpostavkom da je putanja laserskog snopa opisana pravcem. No, zbog otklona laserskog snopa prolazom kroz pojedine senzore stvarna će putanja odstupati od pravca (vidi sliku 9.10).



Slika 9.10: Odstupanje laserske putanje od pravca uslijed otklona laserskog snopa prolazom kroz senzor.

U trećem, najtočnijem mjerenju koordinata $\tilde{x}^b_{lok}(i_m, i_s, i_b)$ i $\tilde{y}^b_{lok}(i_m, i_s, i_b)$ uzeti su u obzir i baždarni parametri radi točne rekonstrukcije putanje laserskog snopa. Koordinate su dane izrazima:

$$\tilde{x}^b_{lok}(i_m, i_s, i_b) = \tilde{x}_{lok}(i_m, i_s, i_b) - (-1)^{i_s} \cdot \Delta x(i_s) - S_x(i_s) \tag{9.1}$$

$$\tilde{y}^b_{lok}(i_m, i_s, i_b) = \tilde{y}_{lok}(i_m, i_s, i_b) - \Delta y(i_s) - S_y(i_s), \tag{9.2}$$

Pritom su Δx(i$_s$) i Δy(i$_s$) relativni odmaci aktivnih senzorskih ploha od nominalnih položaja na metalnom okviru. Suprotni predznak (-1)^{i_s} prisutan je za tri senzora (ns031, ns023, ns013) koji su na platforme teleskopa postavljeni u invertiranoj orijentaciji.

Treći član u oba izraza sadrži doprinos otklona laserskog snopa ($\theta_{x,y}$), te translacije uslijed konačnog kuta upada ($\delta_{x,y}$):

$$S_{x,y}(1) = 0 \tag{9.3}$$

$$S_x(i_s) = \Sigma_{j=2}^{i_s}\{\vartheta_x(j-1) \cdot (z_j - z_{j-1}) + \delta_x(j-1)\}; i_s = 2, .., 6 \tag{9.4}$$

$$S_y(i_s) = \Sigma_{j=2}^{i_s}\{\vartheta_y(j-1) \cdot (z_j - z_{j-1}) + \delta_y(j-1)\}; i_s = 2, .., 6 \tag{9.5}$$

Pritom je z$_j$ udaljenost od j-tog senzora do laserske diode.

Kut otklona snopa $\theta_{x,y}$ rekonstruira se upotrebom prethodno izmjerenih baždarnih parametara $p_j^{i_s}$ (j=1,..,6; i_s=1,..,6):

$$\theta_x(i_s) = p_{1x}^{i_s} + p_{2x}^{i_s} \cdot \tilde{x}_{lok} + p_{3x}^{i_s} \cdot \tilde{y}_{lok} + p_{4x}^{i_s} \cdot \tilde{x}_{lok} \cdot \tilde{y}_{lok} + p_{5x}^{i_s} \cdot \tilde{x}_{lok}^2 + p_{6x}^{i_s} \cdot \tilde{y}_{lok}^2 \quad (9.6)$$

$$\theta_y(i_s) = p_{1y}^{i_s} + p_{2y}^{i_s} \cdot \tilde{x}_{lok} + p_{3y}^{i_s} \cdot \tilde{y}_{lok} + p_{4y}^{i_s} \cdot \tilde{x}_{lok} \cdot \tilde{y}_{lok} + p_{5y}^{i_s} \cdot \tilde{x}_{lok}^2 + p_{6y}^{i_s} \cdot \tilde{y}_{lok}^2 \quad (9.7)$$

Translacija laserskog snopa određena je izrazom

$$\delta_{x,y} = \frac{n-1}{n} \cdot W \cdot \alpha_{x,y}(i_s), \quad (9.8)$$

gdje je n indeks loma za staklo, W je debljina staklene podloge, $\alpha_{x(y)}(i_s)$ je kut rotacije i_s-tog senzora oko x(y)-osi.

Primjenom rezultata dobivenih CMM-uređajem lokalne se koordinate položaja laserskog snopa transformiraju u globalni koordinatni sustav, $(x_{lok}, y_{lok}, z_{lok}) \rightarrow (x_{gl}, y_{gl}, z_{gl})$. Na taj način može se ispitati učinkovitost senzora.

9.2.2 Reproducibilnost pozicioniranja senzora

Apsolutni položaj optičkih senzora bit će izmjeren CMM-uređajem prilikom postavljanja senzora na platforme teleskopa u detektoru ATLAS. Tijekom rada detektora povremeno će se zbog održavanja javljati potreba za popravkom ili zamjenom pojedinih senzora. Ponovnim postavljanjem senzora na odgovarajuću platformu ne smije doći do promjene njegovog apsolutnog položaja.

Prije samog ispita učinkovitosti polarnog monitora ispitana je reproducibilnost pozicioniranja senzora. Jedan je senzor tri puta uzastopce učvršćen na platformu teleskopa, pri čemu su svaki put izmjerene globalne koordinate njegovog položaja ($\mathbf{r}_O$, $\mathbf{v}_O$, $\mathbf{r}_P$, $\mathbf{v}_P$, $\mathbf{r}_B$, $\mathbf{v}_B$). Također se mjeri i položaj (x_{lok},y_{lok}) stabilnog laserskog snopa. Tablica 9.2 prikazuje rezultate mjerenja.

	$\mathbf{r}_O$ (mm)	$\mathbf{r}_P$ (mm)	$\mathbf{r}_B$ (mm)	(x_{lok}, y_{lok}) (μm)
1.	(-178.906, 70.204, -3681.639)	(-238.833, 146.201, -3700.373)	(-291.914, 114.422, -3698.025)	*(684, -1294)*
2.	(-178.906, 70.202, -3681.638)	(-238.833, 146.201, -3700.372)	(-291.914, 114.421, -3698.025)	*(683, -1295)*
3.	(-178.906, 70.203, -3681.638)	(-238.832, 146.203, -3700.377)	(-291.913, 114.421, -3698.025)	*(682, -1296)*

Tablica 9.2: Reproducibilnost pozicioniranja senzora.

Mjerenje CMM-uređajem, kao i mjerenje senzorom pokazuju reproducibilnost bolju od 2 μm, što omogućuje ostvarenje stabilnog sustava za nadzor položaja.

9.2.3 Mjerenje prividne sagite

Položaj laserskog snopa mjeren u dva vanjska teleskopa (transformiran u globalni koordinatni sustav) definira pravac, te se promatra odstupanje srednjeg teleskopa od tog pravca. Tako je sagita dana izrazom

$$Sag_x(n_{s1}, n_{s2}, n_{s3}) = x_{gl}(n_{s1}) + \frac{x_{gl}(n_{s3}) - x_{gl}(n_{s1})}{z_{gl}(n_{s3}) - z_{gl}(n_{s1})} \cdot [z_{gl}(n_{s2}) - z_{gl}(n_{s1})] - x_{gl}(n_{s2}) \tag{9.9}$$

$$Sag_y(n_{s1}, n_{s2}, n_{s3}) = y_{gl}(n_{s1}) + \frac{y_{gl}(n_{s3}) - y_{gl}(n_{s1})}{z_{gl}(n_{s3}) - z_{gl}(n_{s1})} \cdot [z_{gl}(n_{s2}) - z_{gl}(n_{s1})] - y_{gl}(n_{s2}) \tag{9.10}$$

(x_{gl}, y_{gl}, z_{gl}) su koordinate položaja laserskog snopa u globalnom koordinatnom sustavu, n_{s1}=1,2 je redni broj senzora na prvom teleskopu, n_{s2}=3,4 je redni broj na drugom, a n_{s3}=5,6 na trećem teleskopu. Stoga pri određivanju sagite možemo promatrati osam kombinacija senzorskih tripleta (za danu orijentaciju laserskog snopa). Dodatno, promatramo devet različitih orijentacija snopa. Sve ovo ponovljeno je u osam različitih orijentacija srednjeg teleskopa. Na taj se način dobiva velika statistika u mjerenju prividne sagite.

U slučaju idealnog polarnog monitora mjerenje će rezultirati prividnom sagitom jednakom nuli (jer se tijekom mjerenja senzori ne pomiču iz nominalnih položaja izmjerenih CMM-uređajem). Odstupanja od srednje vrijednosti govore o razlučivosti prividne sagite, koja mora biti bolja od 20 μm.

Slika 9.11 prikazuje raspodjelu izmjerenih prividnih sagita u ovisnosti o tripletu senzora upotrebljenom za očitavanje položaja laserskog snopa. Prikazani su rezlutati za tri slučaja:

(a) bez primjene korekcije utjecaja refleksije i bez upotrebe baždarnih parametara

(b) primijenjene su korekcije utjecaja refleksije laserskog snopa, baždarni parametri nisu uzeti u obzir

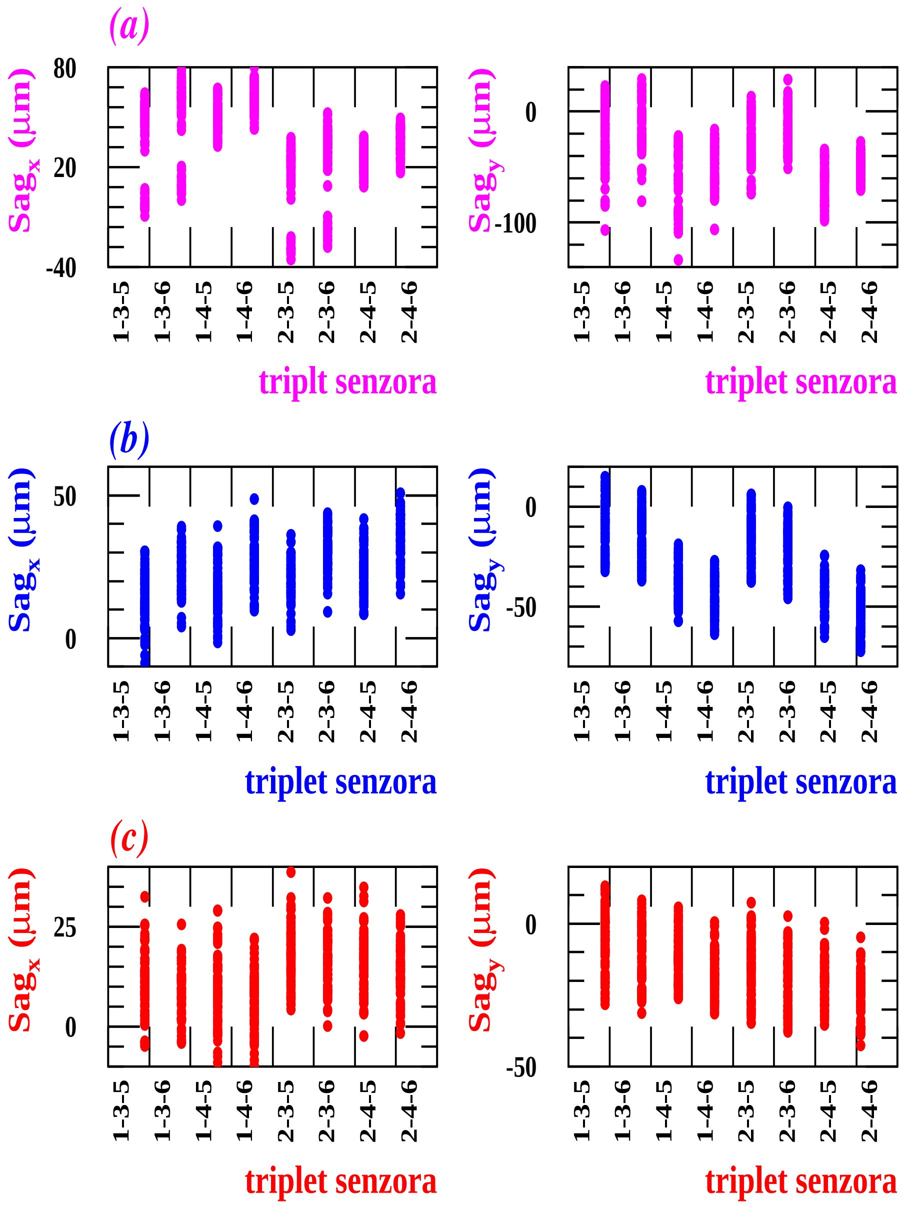
(c) primijenjene su korekcije utjecaja refleksije i uzeti u obzir baždarni parametri (mehanički odmak mjeren laserom, a ne mikroskopom)

Bez primjene korekcija opažaju se znatna odstupanja od srednje vrijednosti. Odstupanja se smanjuju primjenom korekcija na utjecaj reflektirane svjetlosti laserskog snopa. Nakon što se u obzir uzmu i baždarni parametri, prividna sagita postaje bliska postavljenim zahtjevima.

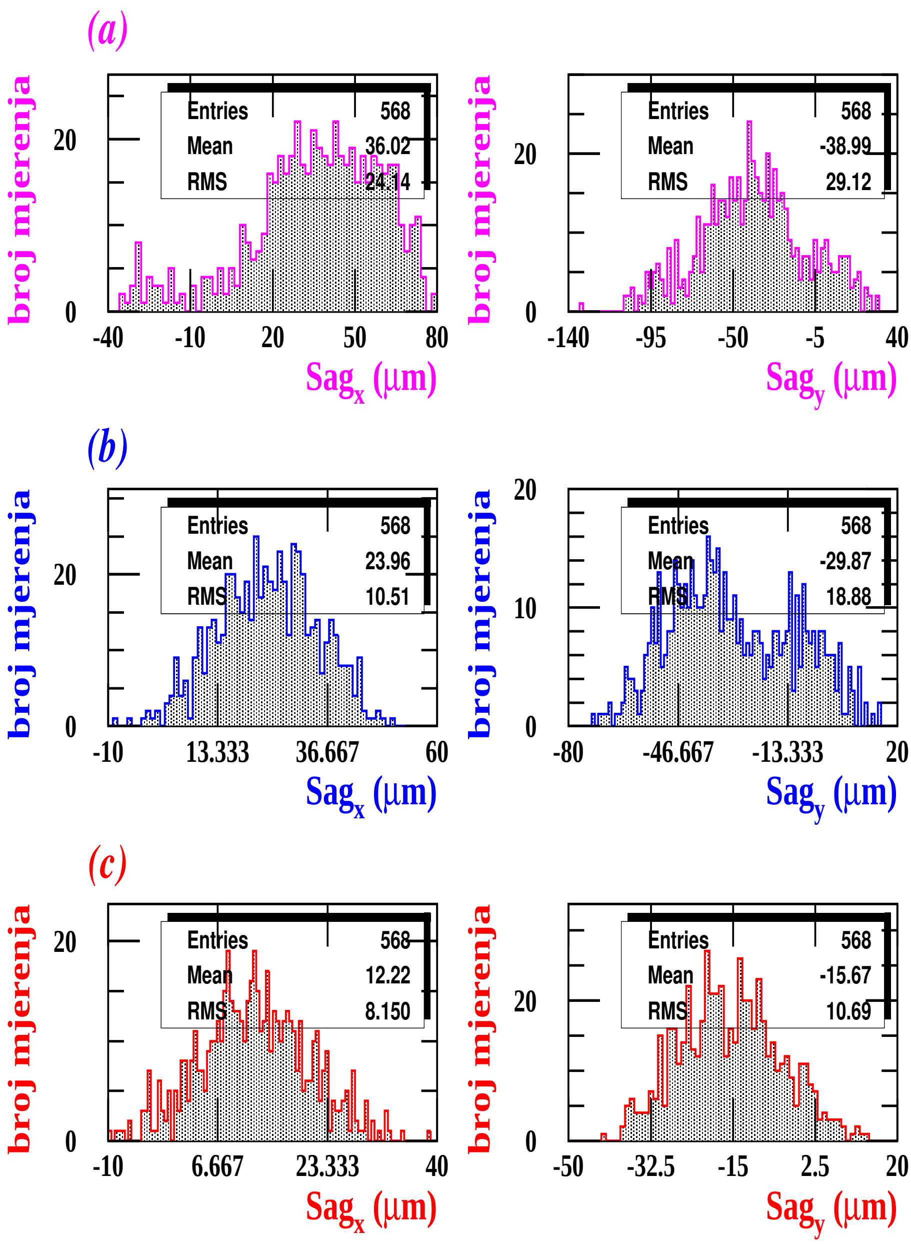
Jednodimenzionalne projekcije ovih raspodjela prikazane su na slici 9.12.

Ako se pri mjerenju položaja laserskog snopa ne primijene odgovarajuće korekcije, izmjerena prividna sagita znatno odstupa od nule. Primjenom korekcija na utjecaj refleksije snopa izmjerena vrijednost postaje bliža stvarnoj prividnoj sagiti, ali točnost mjerenja još uvijek nije unutar postavljenih zahtjeva. Time je naznačena važnost preciznih baždarnih parametara. Primjenom tih parametara postiže se precizno mjerenje prividne sagite (izmjerene vrijednosti $< Sag_x >$=(12±8) μm i $< Sag_y >$=(16±11) μm unutar su postavljenih zahtjeva).

Ispit učinkovitosti polarnih monitora izveden je pri najvećem dostupnom razmaku vanjskih teleskopa, kako bi se pokazala preciznost baždarnog postupka. Naime, nepreciznost kutova otklona (θ_x, θ_y) to više dolazi do izražaja što je udaljenost između dva senzora veća. Dobiveni rezultati dokazuju učinkovitost baždarenja.



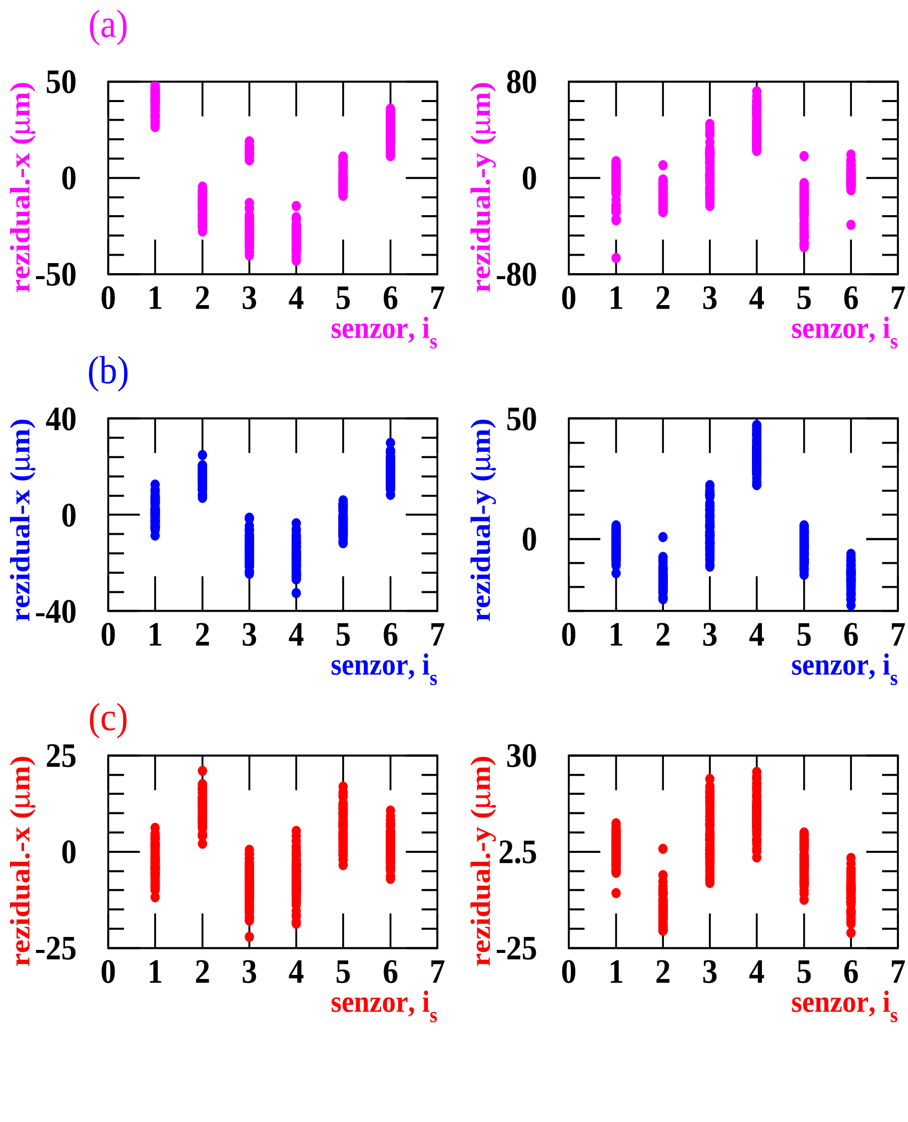
Slika 9.11: Raspodjela sagite za različite kombinacije senzorskih tripleta. Promatrani su slučajevi (a) bez korekcija, (b) s korekcijom utjecaja refleksije, te (c) s korekcijom utjecaja refleksije i primjenom baždarnih parametara.



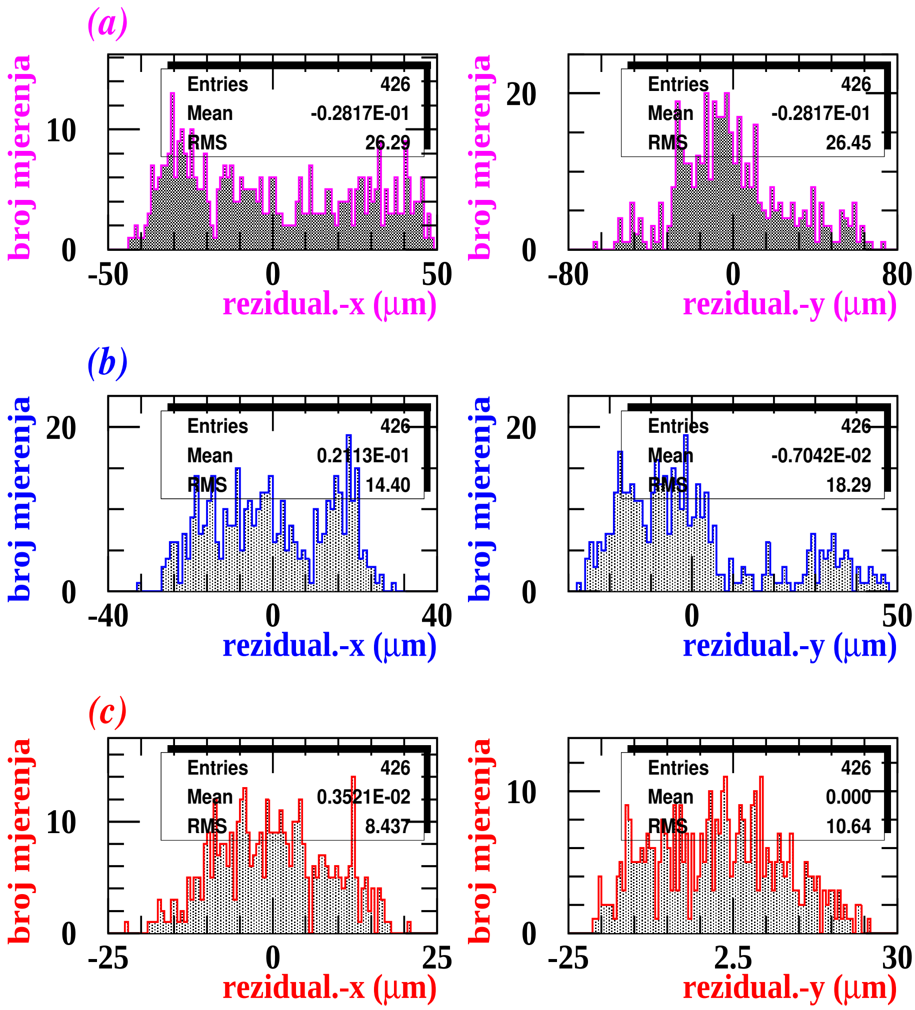
Slika 9.12: Jednodimenzionalne projekcije raspodjela sagite. Promatrani su slučajevi (a) bez korekcija, (b) s korekcijom utjecaja refleksije, te (c) s korekcijom utjecaja refleksije i primjenom baždarnih parametara.

9.2.4 Rezidualne vrijednosti prilagodbe pravca na mjereni položaj laserskog snopa

Dodatni test preciznosti senzora u mjerenju položaja laserskog snopa dobiva se prilagodbom pravca na mjerene koordinate položaja. Raspodjela rezidualnih vrijednosti (tj. razlike mjerenih točaka i onih dobivenih prilagodbom pravca) govori o moći razlučivanja položaja. Slike 9.13 i 9.14 prikazuju raspodjele rezidualnih vrijednosti (posebno za x-, te posebno za y-koordinatu) za tri spomenuta koraka u postupku korekcija.



Slika 9.13: Raspodjela rezidualnih vrijednosti prilagodbe pravca za 6 senzora. Promatrani su slučajevi (a) bez korekcija, (b) s korekcijom utjecaja refleksije, te (c) s korekcijom utjecaja refleksije i primjenom baždarnih parametara.



Slika 9.14: Jednodimenzionalne projekcije rezidualnih vrijednosti prilagodbe pravca. Promatrani su slučajevi (a) bez korekcija, (b) s korekcijom utjecaja refleksije, te (c) s korekcijom utjecaja refleksije i primjenom baždarnih parametara.

Kao što se i očekuje, rezidualne vrijednosti postaju sve manje sa svakim novim korakom korekcija. Srednje vrijednosti jednodimenzionalnih raspodjela su (po definiciji prilagodbe) približno jednake nuli. RMS raspodjele smanjuje se nakon primjene korekcija utjecaja refleksije, jer se tek tada mjeri stvarni položaj snopa na površini senzora. Nakon upotrebe baždarnih parametara putanja laserskog snopa može se poistovjetiti s pravcem, pa tek posljednji korak daje informaciju o preciznosti senzora.

Treba napomenuti da opaženi RMS od $\sim$10 μm uključuje dva efekta. Jedan je moć razlučivanja senzora pri mjerenju položaja laserskog snopa (za koju je u laboratorijskim ispitivanjima izmjereno $\sigma_{x,y}$ $\sim$2-3 μm), a drugi je preciznost mjerenja CMM-uređajem (koja iznosi $\sim$5 μm).

9.2.5 Kutna razlučivost smjera laserskog snopa teleskopom ALMY

Jedna od odrednica sustava za nadzor položaja u end-cap području mionskog spektrometra detektora ATLAS je mogućnost rekonstrukcije relativnih položaja unutrašnje (EI) i vanjske (EO) mionske komore u odnosu na središnju (EM). To je omogućeno mjerenjem smjera laserskog snopa središnjim optičkim teleskopom (smjer laserskog snopa definiran je kutom α).

Kutna razlučivost tog mjerenja ispitana je na sljedeći način. Koordinate položaja laserskog snopa izmjerene na dva senzora srednjeg teleskopa definiraju pravac, koji se ekstrapolira prema dva vanjska teleskopa. Oni daju kutno odstupanje ($\Delta\alpha_x$, $\Delta\alpha_y$) od ekstrapoliranog pravca:

$$\Delta\alpha_x(i_s) = \frac{x_{gl}(3) + \frac{x_{gl}(4)-x_{gl}(3)}{z_{gl}(4)-z_{gl}(3)} \cdot [z_{gl}(i_s) - z_{gl}(3)] - x_{gl}(i_s)}{|z_{gl}(i_s) - z_m|} \tag{9.11}$$

$$\Delta\alpha_y(i_s) = \frac{y_{gl}(3) + \frac{y_{gl}(4)-y_{gl}(3)}{z_{gl}(4)-z_{gl}(3)} \cdot [z_{gl}(i_s) - z_{gl}(3)] - y_{gl}(i_s)}{|z_{gl}(i_s) - z_m|}, \tag{9.12}$$

$$i_s = 1, 2, 5, 6$$

Pritom su $x_{gl}(n)$ i $y_{gl}(n)$ x- i y-koordinata položaja laserskog snopa, mjerene n-tim senzorom. z_m je udaljenost srednjeg teleskopa od laserske diode,

$$z_m = \frac{z_{gl}(3) + z_{gl}(4)}{2}. \tag{9.13}$$

Udaljenost između trećeg i četvrtog senzora (u teleskopu) jednaka je $l\approx 10$ cm. U slučaju idealnog polarnog monitora ovako definirano kutno odstupanje blisko je nuli. Zbog pogreške σ_{poz} u određivanju globalnih koordinata laserskog snopa javljaju se odstupanja od nule. Očekuje se sljedeća ovisnost kutne razlučivosti $\sigma_{\Delta\alpha}$ o σ_{poz}:

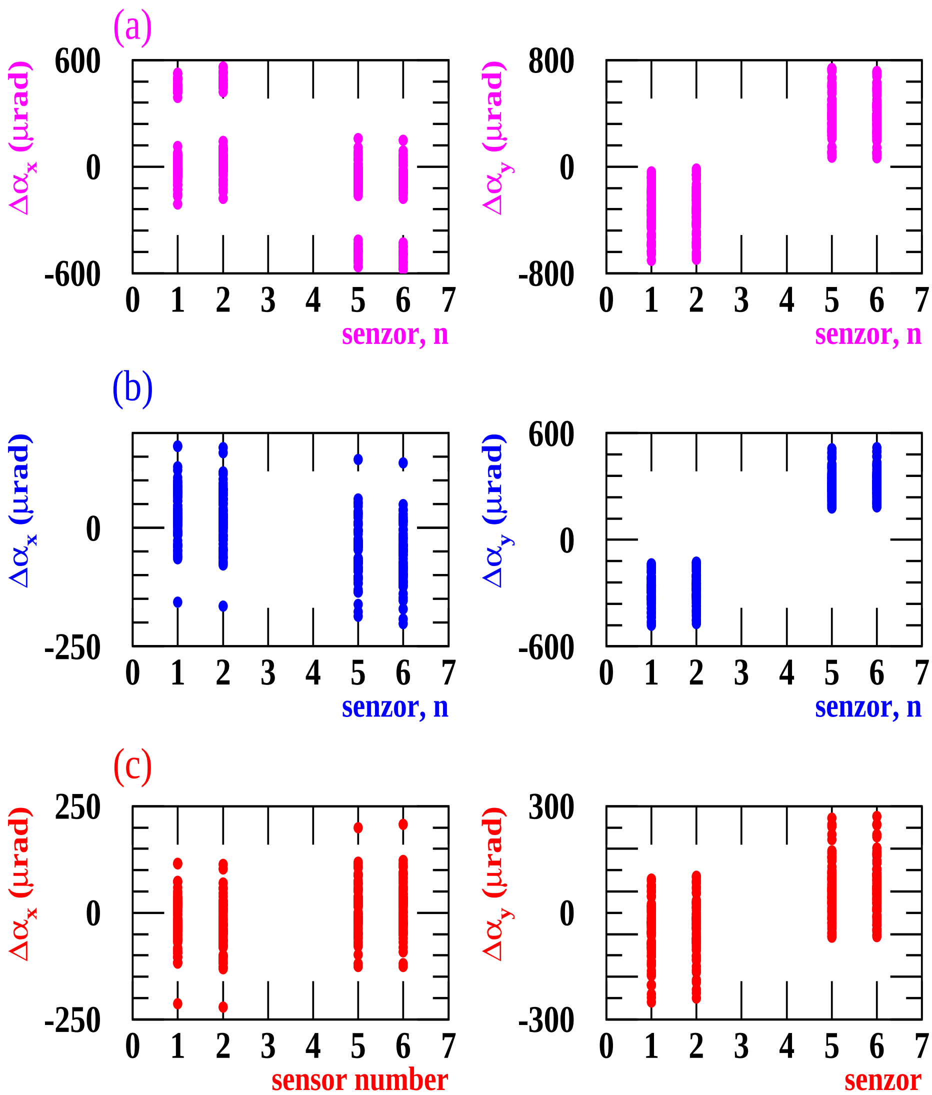
$$\sigma_{\Delta\alpha} = \frac{\sqrt{2}\sigma_{poz}}{l} \tag{9.14}$$

Raspodjele mjerenih kutnih odstupanja prikazuje slika 9.15. Jednodimenzionalnu projekciju ovih raspodjela prikazuje slika 9.16. Kutno odstupanje mjereno prvim teleskopom suprotnog je predznaka od onog mjerenog trećim teleskopom, pa je njihova srednja vrijednost uvijek konzistentna s nulom. U prikazanim jednodimenzionalnim raspodjelama predznak kutnog odstupanja mjerenog trećim teleskopom pomnožen je s (-1), tako da srednja vrijednost ("Mean") sadrži informaciju o apsolutnom kutnom odstupanju. RMS vrijednosti raspodjela odgovaraju kutnoj razlučivosti $\sigma_{\Delta\alpha}$ optičkog teleskopa.

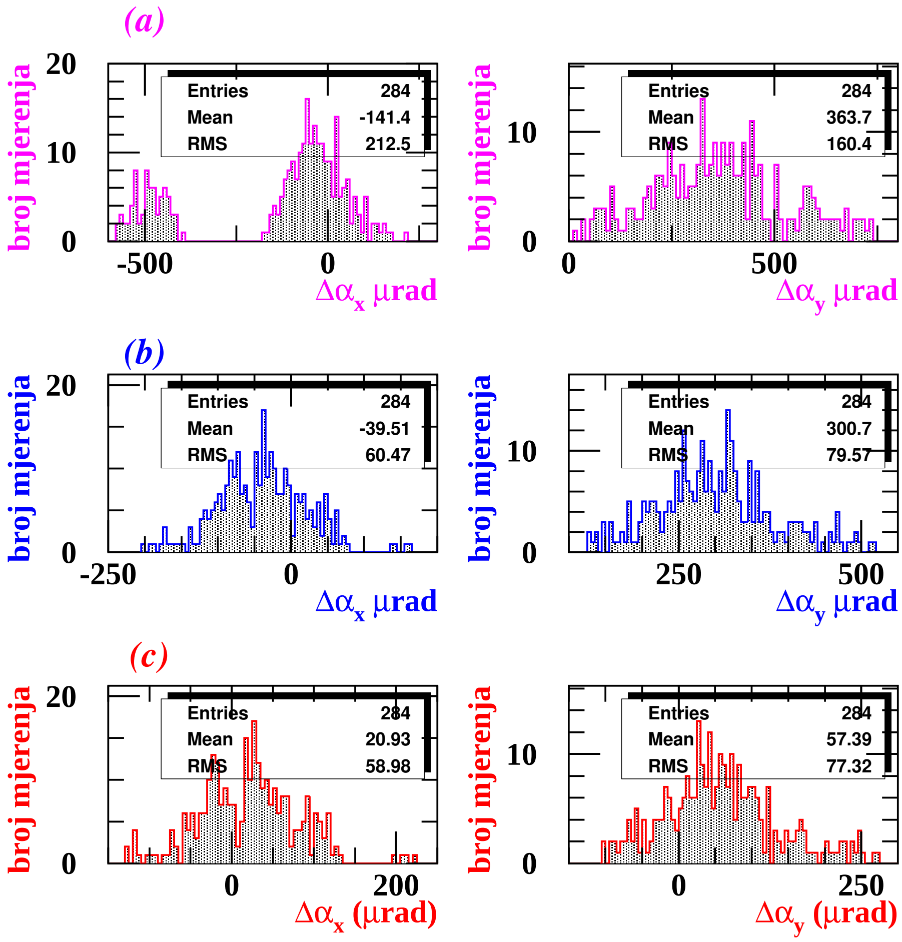
Iako korekcije bitno poboljšavaju kutnu razlučivost, izmjerena kutna odstupanja $\Delta\alpha_x$=(21±59) μrad i $\Delta\alpha_y$=(57±77) μrad još su uvijek izvan postavljenih zahtjeva (tj. kutna razlučivost je iznad traženih 50 μrad).

Pogreški σ_{poz} doprinose moć razlučivanja položaja laserskog snopa, preciznost poznavanja položaja aktivne plohe senzora na metalnom okviru, te preciznost mjerenja CMM-uređaja. Za σ_{poz}=5 μrad očekuje se kutna razlučivost $\sigma_{\Delta\alpha}\approx$50 μrad.

Moć razlučivanja izmjerena u površinskim ispitivanjima senzora iznosi $\sim$2 μm. Mnogo je važniji doprinos pogreške u mjerenju mehaničkog odmaka od nominalnog položaja aktivne plohe na metalnom okviru (>5 μm, vidi prethodna poglavlja).



Slika 9.15: Kutno odstupanje $\Delta\alpha$ mjereno n-tim senzorom. Promatrani su slučajevi (a) bez korekcija, (b) s korekcijom utjecaja refleksije, te (c) s korekcijom utjecaja refleksije i primjenom baždarnih parametara.



Slika 9.16: Jednodimenzionalne projekcije raspodjela kutnog odstupanja $\Delta\alpha$. Promatrani su slučajevi (a) bez korekcija, (b) s korekcijom utjecaja refleksije, te (c) s korekcijom utjecaja refleksije i primjenom baždarnih parametara.

Rezultat ispita učinkovitosti ukazuje na potrebu za novim poboljšanjima. Za senzore koji su trenutno u izradi mnogo se više pažnje polaže na preciznije pozicioniranje aktivne plohe senzora na metalni okvir. Također se razvijaju metode za preciznije učvršćivanje senzora na platformu teleskopa.

Najjednostavnije i vrlo lako izvedivo rješenje opaženog problema je upotreba teleskopa s dvostruko većim razmakom senzora (l=20 cm). Predviđeni geometrijski raspored sustava za nadzor položaja dopušta ovakvu izmjenu.

9.2.6 Reproducibilnost mjerenja u ispitu učinkovitosti

Kao što je spomenuto, dva su mjerenja (pod rednim brojem 5 i 6) u ispitu učinkovitosti polarnih monitora izvedena u ekvivalentnim uvjetima, kako bi se provjerila reproducibilnost rezultata mjerenja. Tablica 9.3 daje usporedbu rezultata dobivenih u ta dva mjerenja.

	5.mjerenje	**6.mjerenje**
Sag$_x$ (μm)	11±6	8±8
Sag$_y$ (μm)	-17±8	-20±9
$\Delta\alpha_x$ (μrad)	24±23	87±32
$\Delta\alpha_y$ (μrad)	-5±47	20±43

Tablica 9.3: Usporedba rezultata dvaju ekvivalentnih mjerenja u ispitu učinkovitosti polarnih monitora.

Izmjerene sagite u dobrom su slaganju. y-komponente kutnog odstupanja također se slažu u okviru RMS vrijednosti. Opaža se određena razlika u mjerenju x-komponente kutnog odstupanja. Svako mjerenje sastoji se od dva dijela: jedan je mjerenje položaja laserskog snopa, a drugi mjerenje položaja senzora CMM-uređajem. Koji od ta dva dijela više utječe na reproducibilnost može se vidjeti ako se rezultati jednog mjerenja CMM-uređajem (5.mjerenje, CMM-5) kombiniraju s oba laserska mjerenja (laser-5 i laser-6). Takva usporedba govori o reproducibilnosti mjerenja položaja laserskog snopa. Tablica 9.4 prikazuje dobivene rezultate:

	CMM-5 & laser-5	**CMM-5 & laser-6**
Sag$_x$ (μm)	11±6	11±6
Sag$_y$ (μm)	-17±8	-18±9
$\Delta\alpha_x$ (μrad)	24±23	20±31
$\Delta\alpha_y$ (μrad)	-4±50	32±42

Tablica 9.4: Reproducibilnost mjerenja položaja laserskog snopa.

Reproducibilnost je nešto bolja nego u prvom slučaju, te je mjerenje x-komponente kutnog odstupanja u ovom slučaju reproducibilno. Može se zaključiti da je mjerenje CMM-uređajem nešto manje reproducibilno od mjerenja položaja laserskog snopa senzorima.

9.2.7 Zaključci kratkodosežnog ispita

Na temelju rezultata navedenih u tablici 9.5 mogu se izvesti zaključci za kratkodosežni ispit:

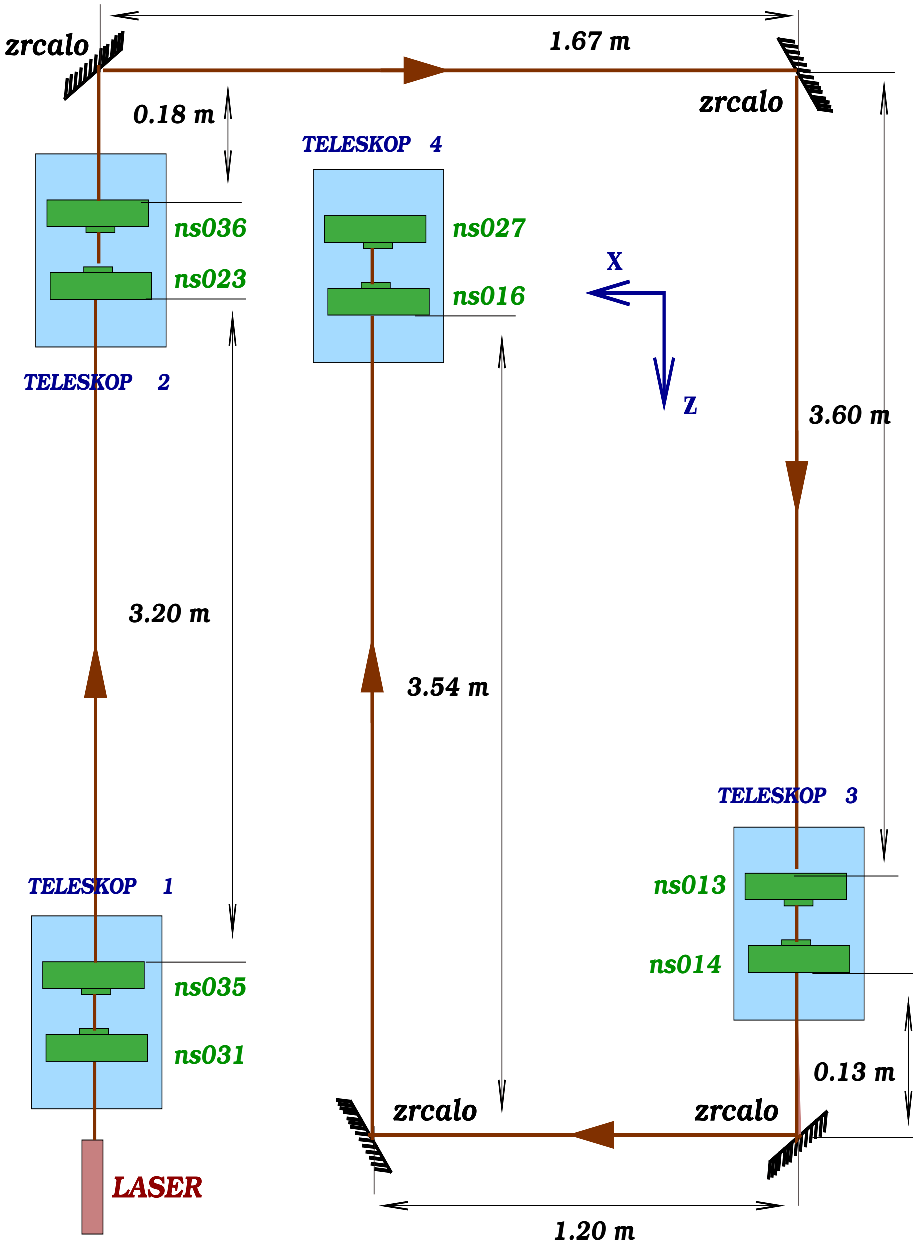
	Sag$_x$ (μm)	**Sag**$_y$ (μm)	$\sigma_{\Delta\alpha_x}$ (μrad)	$\sigma_{\Delta\alpha_y}$ (μrad)
bez korekcija	36±24	-39±29	213	160
korekcije refleksije	24±11	-30±19	60	80
korekcije refleksije+baždarenje	12±8	-16±11	59	77

Tablica 9.5: Sažeti prikaz rezultata kratkodosežnog ispita učinkovitosti polarnih monitora.

Opaža se da primjena korekcija utjecaja refleksije laserskog snopa i upotreba baždarnih parametara bitno poboljšavaju učinkovitost polarnog monitora. Uz primjenu navedenih korekcija postiže se precizno mjerenje prividne sagite polarnim monitorim ALMY (točnost mjerenja je unutar traženih 20 μm). Za kutnu razlučivost rezultat je nešto lošiji (tj. iznad traženih 50 μrad), ali se efikasno može poboljšati upotrebom teleskopa s većim razmakom između senzora.

9.3 Dugodosežni ispit učinkovitosti

Pojednostavljeni prikaz postave dugodosežnog ispita dan je na slici 9.17.



Slika 9.17: Pojednostavljeni prikaz eksperimentalne postave dugodosežnog ispita učinkovitosti polarnog monitora ALMY.

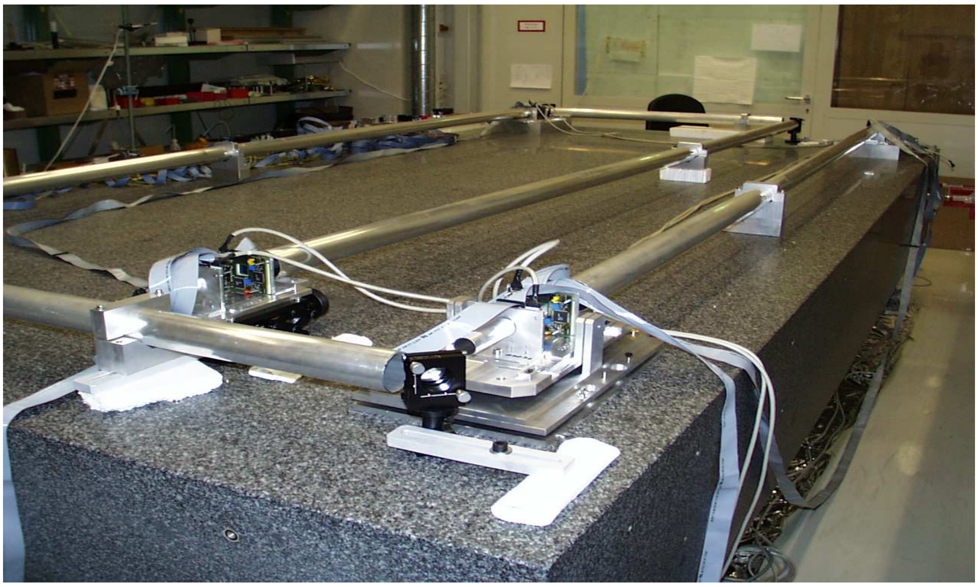
Putanja laserskog snopa produžena je upotrebom zrcala. Duljina od ~14 m slična je maksimalnom dosegu polarnog monitora u detektoru ATLAS. Duž putanje snopa postavljena su četiri optička teleskopa. Drugi teleskop postavljen je na pomičnu platformu.

Osnovni je cilj dugodosežnog ispita provjera dugoročne stabilnosti laserskog snopa, kao i ispitivanje njegove zakrivljenosti.

9.3.1 Stabilnost laserskog snopa

Ispit učinkovitosti izvodi se u prostoru strogo kontrolirane temperature, tlaka i vlažnosti zraka. To su nužni uvjeti za precizan rad CMM-uređaja (uslijed promjene temperature dolazi do deformacija granitnog stola). Posebna pažnja posvećuje se također uklanjanju čestica prašine i ostalih nečistoća. Klimatizacijskim uređajima ostvareno je neprestano snažno strujanje zraka u prostoriji.

U takvom okruženju moguće je ispitati učinkovitost aluminijskih cijevi za zaštitu putanje laserskog snopa. Izvedeno je nekoliko mjerenja u različitim okruženjima. Svako mjerenje traje oko pola sata.



Slika 9.18: Fotografija eksperimentalne postave dugodosežnog ispita učinkovitosti.

1.) U prvom mjerenju laserski je snop zaštićen aluminijskim cijevima. Tek mali dio putanje u blizini zrcala nije zaštićen (vidi sliku 9.18). Uključeni su klimatizacijski uređaji koji strujanjem zraka održavaju stabilnu temperaturu u prostoriji.

2.) Klimatizacijski uređaji su isključeni kako bi se izbjeglo strujanje zraka. Tijekom trajanja mjerenja temperatura se bitno ne mijenja.

3.) Putanja snopa nije zaštićena aluminijskim cijevima. Klimatizacijski uređaji nisu uključeni.

4.) Putanja snopa nije zaštićena aluminijskim cijevima. Klimatizacijski uređaji su uključeni.

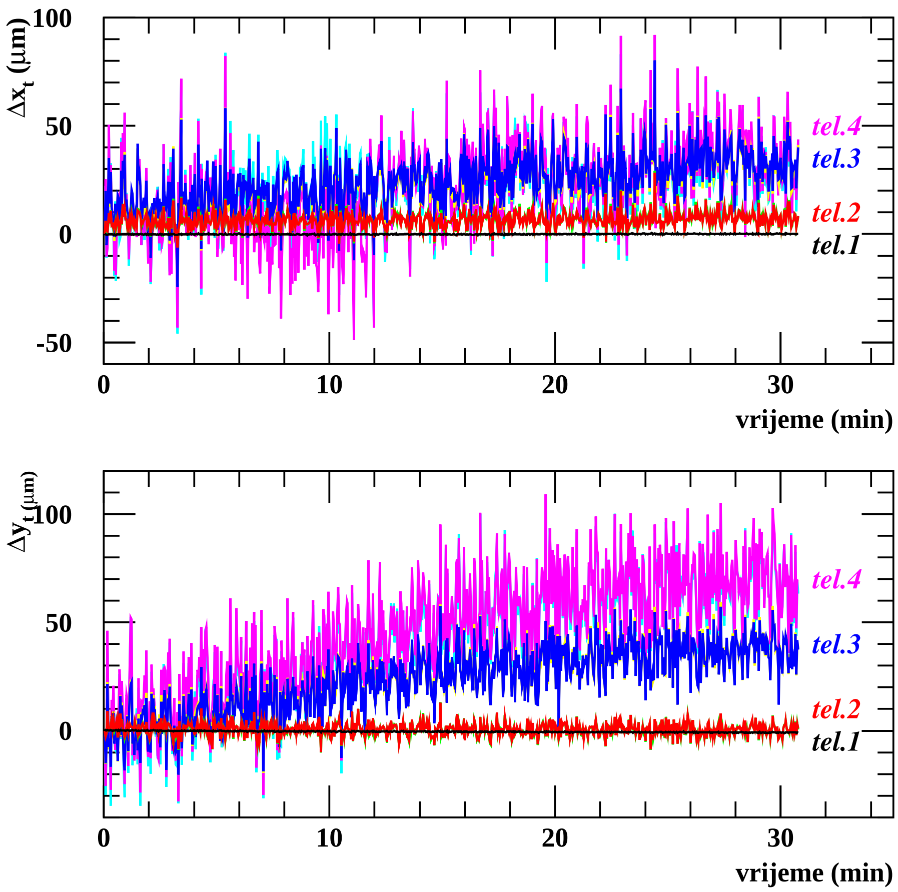
Slika 9.19 prikazuje položaj laserskog snopa u ovisnosti o vremenu, mjeren na svakom od osam senzora. Prikazani su rezultati četvrtog mjerenja (kasnije će biti pokazano da je u tom slučaju laserski snop najstabilniji).

Prosječni položaj laserskog snopa razlikuje se od jednog do drugog senzora, tj. nije nužno jednak nuli. Stoga se promatraju relativni pomaci (Δx_t, Δy_t) snopa u odnosu na početni položaj snopa ($x_{t=0}$, $y_{t=0}$):

$$\Delta x_t(i_s) = x_t(i_s) - x_{t=0}(i_s) \quad (9.15)$$

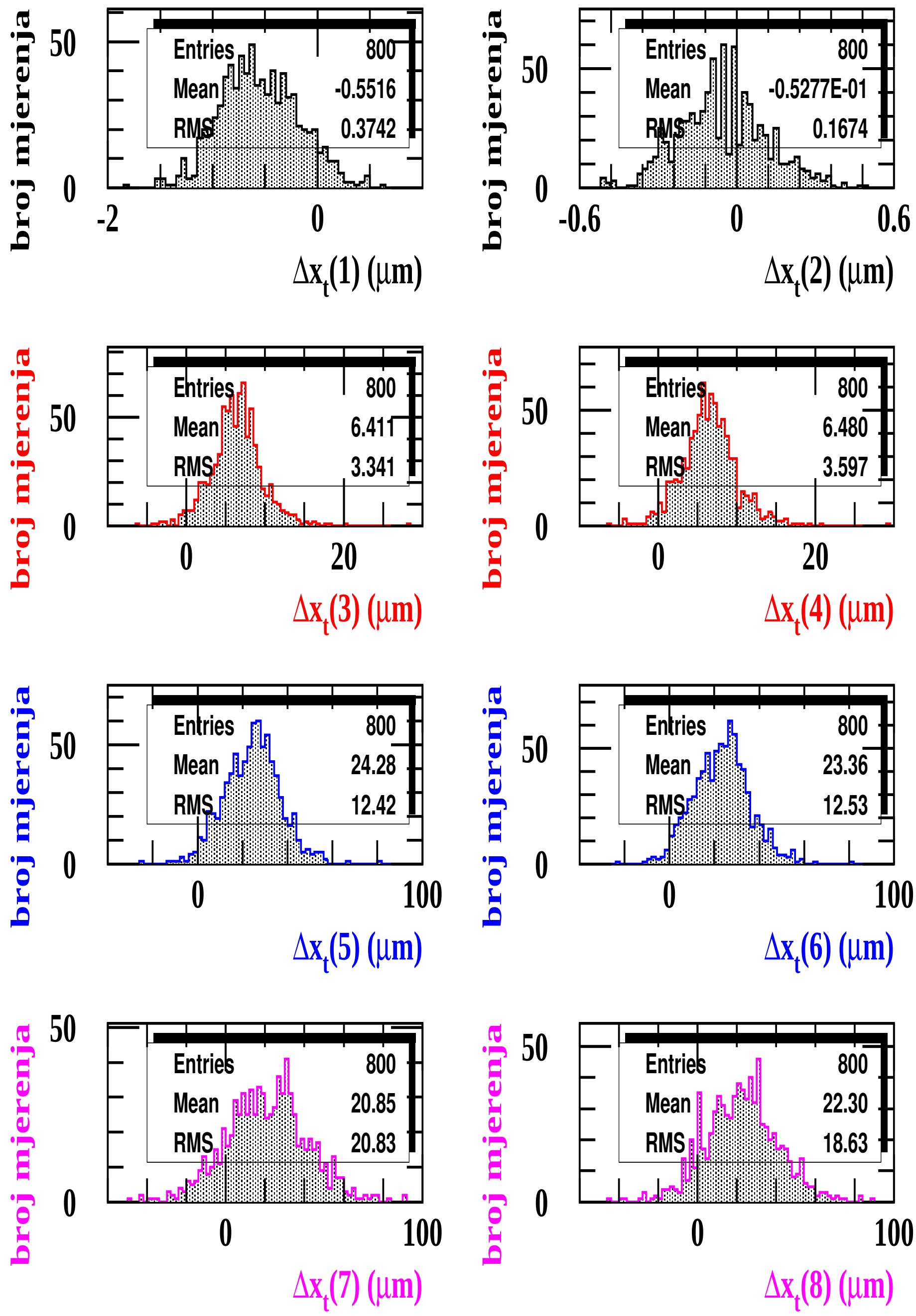
$$\Delta y_t(i_s) = y_t(i_s) - y_{t=0}(i_s), \quad (9.16)$$

gdje je (x_t, y_t) položaj laserskog snopa u danom trenutku t, a i_s je redni broj senzora na kojem se taj položaj mjeri. Opaža se kontinuirani pomak iz početnog položaja, koji je to veći što je udaljenost između laserske diode i teleskopa veća.



Slika 9.19: Promjena položaja laserskog snopa u vremenu, mjerena na četiri teleskopa. Mjerenje je izvedeno u klimatiziranoj prostoriji. Putanja laserskog snopa nije zaštićena aluminijskim cijevima.

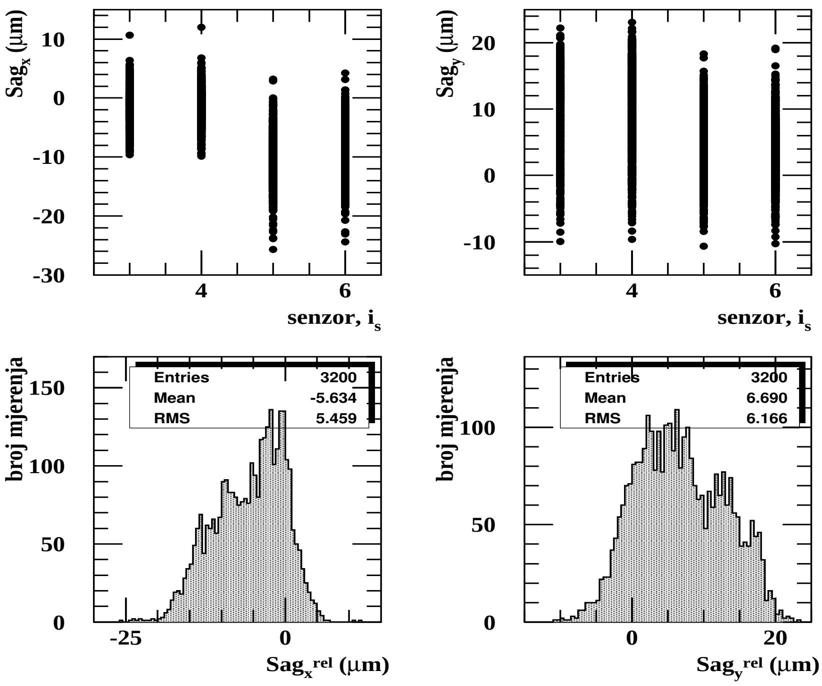
Jednodimenzionalne projekcije pomaka Δx_t, mjerene svakim od osam senzora, prikazane su na slici 9.20. (Sličan rezultat dobiva se i za x-koordinatu.) RMS vrijednosti dobivenih raspodjela mjera su stabilnosti laserskog snopa. Na udaljenosti od 14 m stabilnost laserskog snopa iznosi oko 20 μm.



Slika 9.20: Promjena x-koordinate položaja laserskog snopa, mjereno na osam senzora ALMY na različitim udaljenostima od laserske diode.

9.3.2 Pravocrtnost putanje laserskog snopa

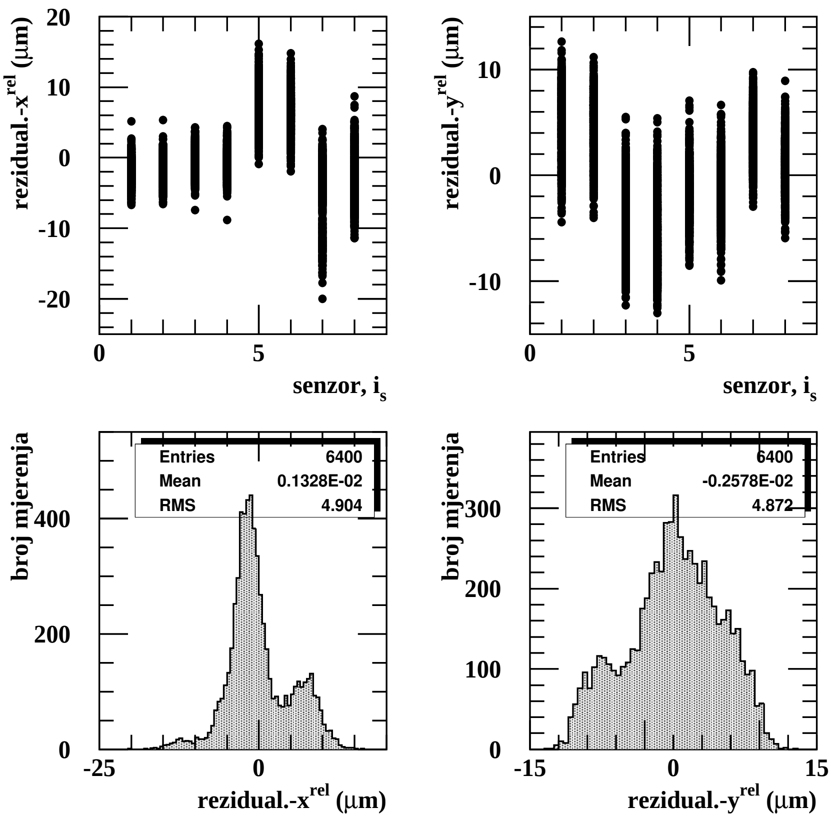
Kontinuirani pomak putanje laserskog snopa iz početnog položaja neće utjecati na preciznost mjerenja prividne sagite pod uvjetom da se ta putanja može dobro opisati pravcem. Deformacije putanje rezultirat će pogreškom mjerenja. Prethodno opaženo povećanje pomaka s povećanjem udaljenosti od laserske diode implicira da dolazi samo do promjene smjera snopa, dok putanja i dalje ostaje pravocrtna. Ova pretpostavka testirana je rekonstrukcijom pravca kroz dva međusobno najudaljenija senzora (prvi i osmi), te promatranjem odstupanja položaja mjerenih na četiri unutarnja senzora (treći, četvrti, peti i šesti u nizu) od tog pravca. Mjerenja drugog i sedmog senzora (koji su najbliži vanjskim senzorima) nisu uzeta u obzir, jer daju najmanja odstupanja od pravca. Rezultati su prikazani na slici 9.21.



Slika 9.21: Relativno mjerenje sagite na četiri unutarnja senzora u postavi dugodosežnog ispita. Prikazane su (a) raspodjela sagite u ovisnosti o rednom broju senzora, te (b) jednodimenzionalne projekcije tih raspodjela.

Budući da u dugodosežnom ispitu nisu mjereni apsolutni položaji senzora, ovo mjerenje daje informaciju samo o preciznosti mjerenja *relativnih pomaka* (u odnosu na početni položaj). Početni položaj laserskog snopa na svakom senzoru izjednačuje se s nulom, tako da je u početnom trenutku sagita mjerena svakim od senzora jednaka nuli. Odstupanje od nule (tijekom trajanja mjerenja) javlja se uslijed deformacija laserskog snopa od pravocrtne putanje. Slika 9.21 pokazuje da je preciznost u mjerenju sagite (RMS) približno $\sim$6 μm.

Dodatni način testiranja pravocrtnosti laserske putanje je prilagodba pravca kroz točke mjerenja svih osam senzora, te promatranje rezidualnih vrijednosti (slično kao u kratkodosežnom ispitu, samo što ovdje u analizu ulaze relativni pomaci $\Delta x(i_s)$ i $\Delta y(i_s)$, a ne apsolutni položaj laserskog snopa). Rezultati su prikazani na slici 9.22.



Slika 9.22: Relativno mjerenje rezidualnih vrijednosti prilagodbe pravca. Prikazane su (a) raspodjele u ovisnosti o rednom broju senzora, te (b) jednodimenzionalne projekcije tih raspodjela.

Moć razlučivanja relativnog položaja laserskog snopa (dana RMS vrijednostima na slici 9.22) iznosi $\sim$5 μm, te demonstrira pravocrtnost laserske putanje. Zrcala koja vode laserski snop od drugog do trećeg, te od trećeg do četvrtog teleskopa daju glavni doprinos mjerenim odstupanjima od pravca (na slici 9.21 opaža se da je kontinuirani pomak snopa malen za prva dva teleskopa između kojih nema zrcala, dok za druga dva postaje veći). Bez upotrebe zrcala (koja nisu predviđena u samom detektoru ATLAS) izmjerena moć razlučivanja bila bi još bolja.

Prethodno navedeni rezultati dobiveni su četvrtim mjerenjem u kojem laserska putanja nije zaštićena aluminijskim cijevima, a tijekom mjerenja uključeni su klimatizacijski uređaji koji održavaju strujanje zraka. Tablica 9.6

prikazuje rezultate dobivene za sva četiri mjerenja u različitim okruženjima.

mjerenje	***uvjeti okruženja***		***RMS*** (Sag_x^{rel}) (μm)	***RMS*** (Sag_y^{rel}) (μm)
	Al cijevi	***klimat.ur.***		
1.	da	da	**25**	**10**
2.	da	ne	**5**	**6**
3.	ne	ne	**7**	**5**
4.	ne	da	**5**	**6**

Tablica 9.6: Moć razlučivanja relativne sagite, mjerena eksperimentalnom postavom dugodosežnog ispita, u različitim uvjetima okruženja.

1.) U prvom mjerenju opaža se vrlo loša moć razlučivanja sagite. Razlog je strujanje zraka u prostoriji, iako to u prvi mah zvuči kontradiktorno jer je putanja snopa zaštićena aluminijskim cijevima. No, cijevi ne okružuju putanju potpuno hermetički jer oko zrcala postoji mali dio koji nije zatvoren. Stoga je moguće strujanje zraka na rubovima cijevi, koje može biti i veće od onog u cijeloj prostoriji. Opaženo je da su intervali u kojima dolazi do promjene položaja laserskog snopa približno jednaki intervalu rotacije klimatizacijskih uređaja ($\sim$20 ns).

2.) Isključivanjem klimatizacijskih uređaja prethodno spomenuta pojava nestaje, te snop postaje vrlo stabilan. Nema strujanja zraka, te Al cijevi služe samo za zaštitu od temperaturnih gradijenata (koji se mogu javiti ako su klimatizacijski uređaji isključeni duže vrijeme).

3.) Kao što se i očekuje, uklanjanjem cijevi dolazi do malog smanjenja moći rezolucije.

4.) Ponovnim uključivanjem klimatizacije nestaju postojeći temperaturni gradijenti, te snop postaje stabilniji.

Može se zaključiti da strujanje zraka ne utječe bitno na stabilnost položaja laserskog snopa, čak i bez primjene zaštitnih cijevi. No, ovaj zaključak vrijedi samo ako duž putanje snopa nema temperaturnih gradijenata.

9.4 Zaključci ispita učinkovitosti

Prethodni odlomci detaljno opisuju ispitivanje učinkovitosti polarnih monitora ALMY. Na sličan način ispitani su i senzori STAMP i BCAM. Konačan odabir kandidata koji će se upotrijebiti u polarnom sustavu za nadzor položaja u end-cap području mionskog spektrometra detektora ATLAS izvršen je na temelju usporedbe svih rezultata.

Osim moći razlučivanja sagite i kutne razlučivosti odlučujući su još neki dodatni čimbenici. Jedan od njih je integracija senzora unutar spektrometra. Dimenzije senzora i konstrukcija sustava ne smiju se sukobljavati s predviđenim geometrijskim rasporedom referentne rešetke i mionskih komora. Bitnu ulogu ovdje ima potreba za zaštitnim aluminijskim cijevima.

Preciznost senzora ne smije ovisiti o osvijetljenosti radnog okruženja i o jakim magnetskim poljima, te mora biti otporna na zračenje.

Pouzdano baždarenje senzora jedan je od vrlo važnih preduvjeta za upotrebu. Baždarni postupak mora biti reproducibilan, a baždarni parametri moraju ostati nepromijenjeni tijekom vremena.

Konačno, dodatni važni čimbenik u odabiru je ekonomske prirode - cijena proizvodnje senzora, dostupnost građevnih elemenata, mogućnost održavanja i sl.

Tablica 9.7 sažeto prikazuje rezultate mjerenja moći razlučivanja sagite i kutne razlučivosti za senzore ALMY i BCAM. Za senzore STAMP nema kvantitativnih rezultata - zbog problema s reproducibilnošću baždarnog postupka, te nedostatkom radne snage za obradu podataka.

	sagita		**kutna razlučivost**	
	Sag$_x$ (μm)	**Sag**$_y$ (μm)	$\sigma_{\Delta\alpha x}$ (μrad)	$\sigma_{\Delta\alpha y}$ (μrad)
ALMY	(12 ± 8)	(-15 ± 11)	59	77
BCAM	(-6 ± 8)	(-4 ± 8)	35	17

Tablica 9.7: Rezultati ispita učinkovitosti polarnih monitora.

Dodatno je za sve kandidate pokazana vrlo dobra reproducibilnost pozicioniranja senzora na potpornu strukturu.

Može se zaključiti da oba polarna monitora (ALMY i BCAM) posjeduju potrebnu moć razlučivanja sagite. Kutna razlučivost je u sustavu BCAM unutar postavljenih zahtjeva, a u sustavu ALMY može se ostvariti upotrebom teleskopa s dvostruko većim razmakom senzora.

Niti jedan od kandidata ne sukobljava se s predviđenim geometrijskim rasporedom ugradnje u detektor ATLAS. Preciznost senzora u oba slučaja ne ovisi o osvijetljenosti okruženja.

Otpornost BCAM senzora na zračenje i na jaka magnetska polja još nije detaljno ispitana. Rad senzora ALMY pod utjecajem jakih magnetskih polja ostaje nepromijenjen (Hal-ova mobilnost $<10^{-2}$ cm^{2}V^{-1}s^{-1}). Nekoliko senzora ALMY ozračenih neutronima i fotonima ($>10^{13}$ neutrona/cm^2, >10 MRad γs) pokazalo je veliku otpornost na zračenje.

U prethodnim je poglavljima pokazana preciznost baždarnog postupka senzora ALMY. Preciznost baždarenja senzora BCAM ne može se ispitati na taj način jer se vrši samim CMM-uređajem.

Navedena svojstva pokazuju da su i sustav ALMY i BCAM dobri kandidati za primjenu u sustavu detektora ATLAS. Presudni čimbenik je ekonomski - sve komponente senzora BCAM komercijalno su dostupne. S druge strane, senzori ALMY proizvode se novom tehnologijom koja još nije komercijalno dostupna, te su relativno skuplji. Uslijed toga *za upotrebu u detektoru ATLAS konačno je odabran sustav BCAM.*

No, sustav ALMY i dalje se razvija jer se planira njegova upotreba u nekim drugim visokoenergijskim eksperimentima, kao što je spomenuto na početku rada. Iako neće biti primijenjeni u detektoru ATLAS, opisana detaljna ispitivanja pokazuju vrlo dobru učinkovitost takvog sustava u preciznom mjerenju položaja mehaničkih komponenti. Sustav se trenutno upotrebljava tijekom proizvodnje mionskih komora, za nadgledanje relativnih pomaka među slojevima cijevi. Također služi za oponašanje mionskih tragova (pravocrtna laserska putanja odgovara putanji visokoenergijskog miona) u ispitivanjima rada mionskih komora.

U sljedećem poglavlju bit će spomenuta najnovija poboljšanja u razvoju sustava ALMY. Bit će izneseni preliminarni rezultati nekih ispitivanja treće generacije senzora.

10

Poboljšanja u trećoj generaciji senzora

10.1 Optička svojstva

Jedno od svojstava senzora ALMY II su znatne razlike u kutovima otklona laserskog snopa od senzora do senzora. Stoga je nužno baždarenje svakog senzora. Nedostatak je pojava velikog broja parametara u računalnom programu za očitavanje položaja (do 14 parametara po senzoru). Također, postupak baždarenja zahtijeva dodatno vrijeme prije ugradnje senzora u detektor. Konačan cilj je serijska proizvodnja senzora koji se mogu upotrijebiti i bez baždarenja.

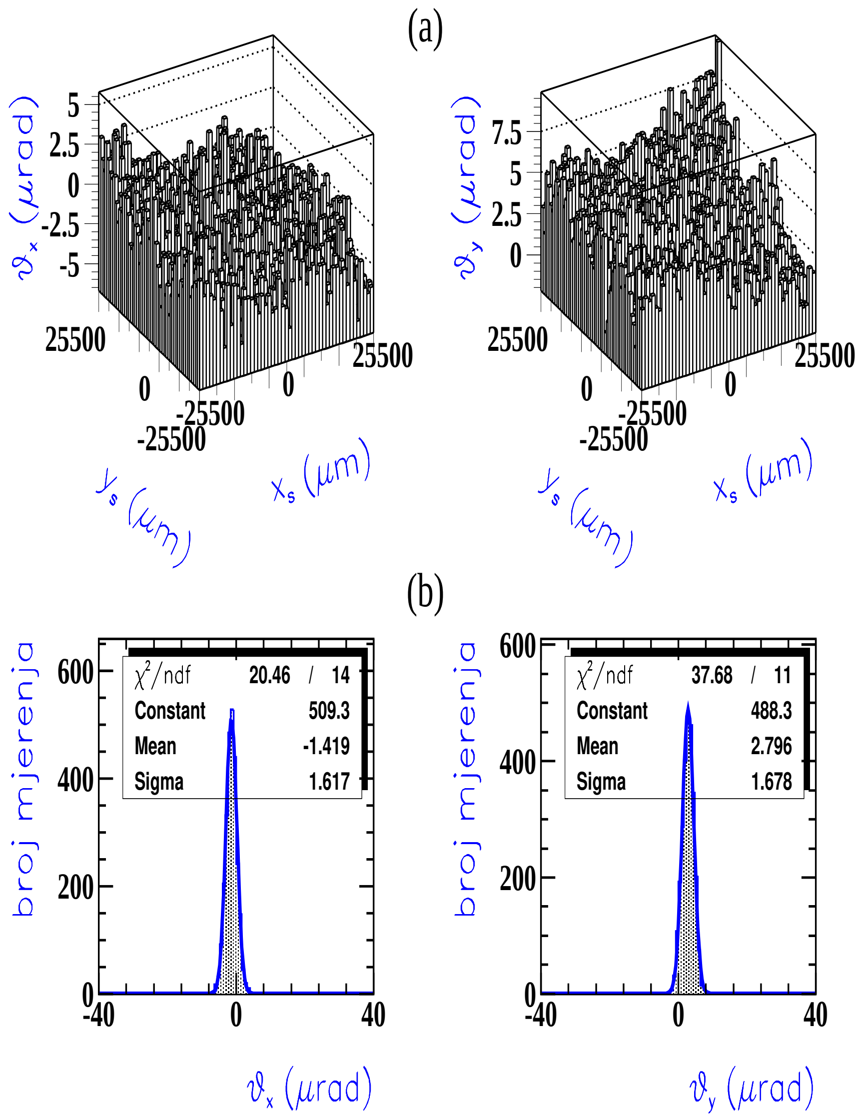
Potreba za baždarenjem javlja se zbog konačnog kuta klina staklene podloge senzora, te zbog zakrivljenosti ploha te podloge. Stoga se razvija nova tehnologija za proizvodnju staklenih ploča s izrazito dobrom paralelnošću ploha. Određeni broj takvih ploča (kružnog oblika i promjera 10 cm) već je proizveden. Rezanjem jedne staklene ploče dobiva se 7 staklenih podloga za senzore.

Slika 10.1 prikazuje rezultate površinskog ispitivanja jedne staklene ploče. Ispitana je površina od 5x5 cm^2 u koracima od jednog milimetra.

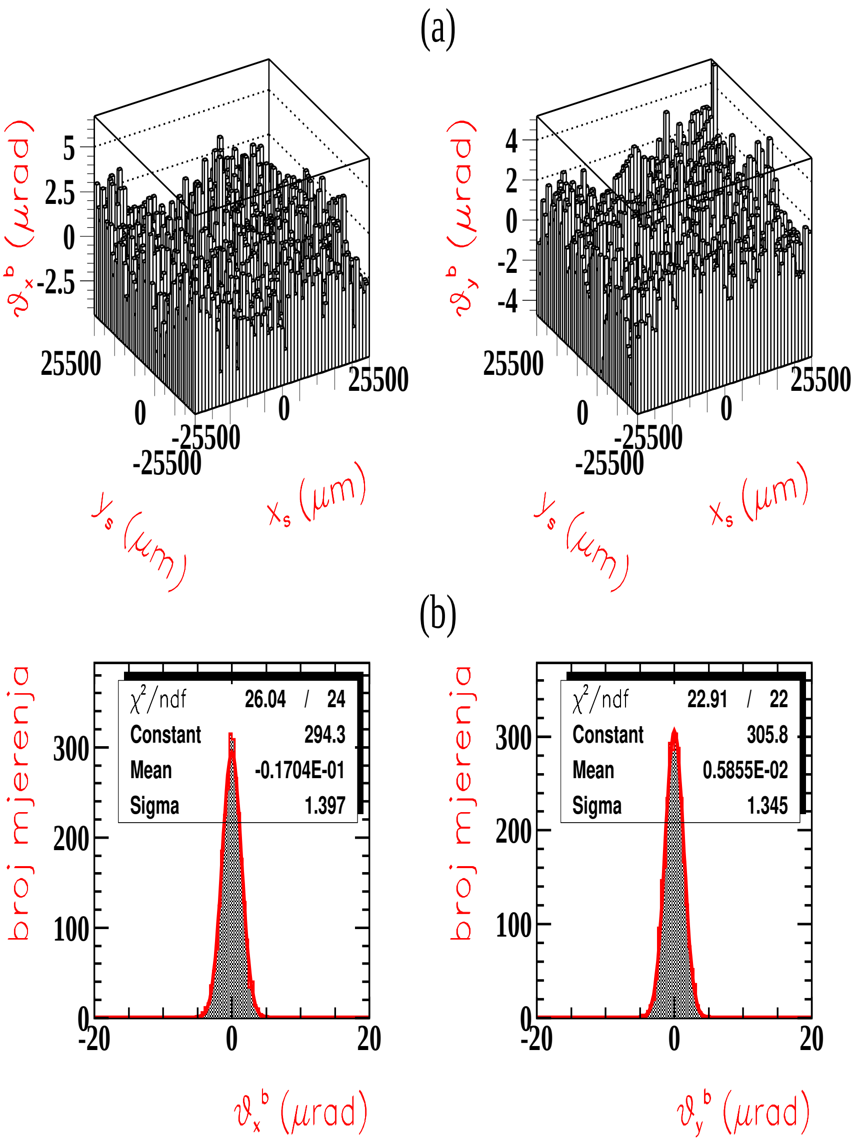
Prosječni kut otklona vrlo je blizak nuli. Neodređenost u mjerenju kuta otklona iznosi $\sim$1.6 μrad. Ograničenje na preciznost dano je jedino statističkom pogreškom mjerenja (tj. varijacijama u položaju laserskog snopa). Može se zaključiti da je paralelnost ploha ispitane staklene ploče izrazito dobra.

Površinska raspodjela vrlo je jednolika, što znači da su te plohe i vrlo ravne. Slika 10.2 prikazuje razliku dobivenu oduzimanjem baždarne funkcije od mjerenih površinskih raspodjela. Ne opaža se bitno poboljšanje u preciznosti izmjerenog kuta otklona (σ_θ $\sim$1.3 μrad), što se i očekuje ako je zakrivljenost staklenih ploha zanemariva.

Ako sve nove staklene podloge budu imale ovakva svojstva, više neće biti potrebe za baždarenjem senzora.



Slika 10.1: Rezultati površinskog ispitivanja staklene ploče promjera 10 cm. Prikazane su (a) površinske raspodjele kuta otklona laserskog snopa, te (b) jednodimenzionalne projekcije tih raspodjela.



Slika 10.2: Razlika izmjerenog kuta otklona laserskog snopa kroz staklenu ploču i kuta određenog baždarenjem. Prikazane su (a) površinske raspodjele razlika, te (b) jednodimenzionalne projekcije tih raspodjela.

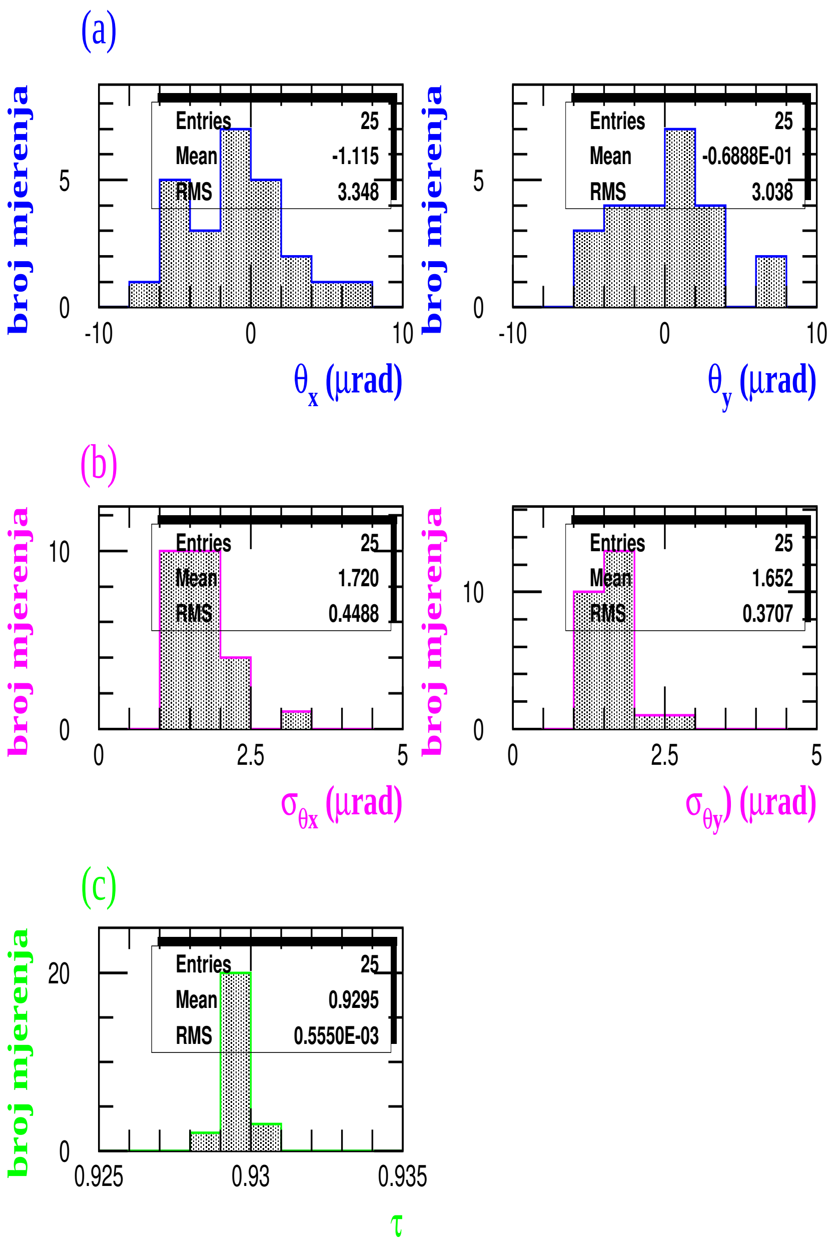
Na ovaj način ispitano je 25 staklenih ploča. Rezultati ispitivanja (kut otklona $\theta_{x,y}$, neodređenost kuta otklona $\sigma_{\theta x,y}$, te transmitivnost τ) navedeni su u tablici 10.1. Prosječni kut otklona laserskog snopa manji je od 5 μrad za gotovo sve staklene ploče, te je površinska raspodjela kuta vrlo jednolika ($\sigma_\theta \sim$2 μrad). Rezultati su također prikazani na slici 10.3.

staklena ploča	ϑ_x (μrad)	ϑ_y (μrad)	$\sigma(\vartheta_x)$ (μrad)	$\sigma(\vartheta_y)$ (μrad)	τ
1.	**2.3**	**6.2**	**1.7**	**1.7**	**0.930**
2.	**-1.7**	**2.1**	**1.3**	**1.5**	**0.928**
3.	**-1.4**	**2.8**	**1.6**	**1.7**	**0.929**
4.	**-4.3**	**6.2**	**2.3**	**1.9**	**0.929**
5.	**8.0**	**2.6**	**1.7**	**1.3**	**0.930**
6.	**-2.1**	**3.6**	**3.3**	**2.9**	**0.929**
7.	**-5.6**	**-3.2**	**1.6**	**1.4**	**0.930**
8.	**4.7**	**-3.2**	**2.1**	**1.5**	**0.930**
9.	**-5.8**	**-4.1**	**1.6**	**1.8**	**0.929**
10.	**-0.9**	**-4.7**	**2.1**	**1.5**	**0.930**
11.	**2.4**	**0.6**	**1.9**	**1.9**	**0.930**
12.	**0.6**	**0.5**	**2.3**	**1.7**	**0.930**
13.	**-1.9**	**-1.6**	**1.9**	**1.7**	**0.930**
14.	**-0.5**	**-3.8**	**1.5**	**1.6**	**0.930**
15.	**1.1**	**-1.0**	**2.0**	**2.5**	**0.930**
16.	**-6.8**	**11.2**	**1.2**	**1.4**	**0.930**
17.	**0.4**	**1.4**	**1.3**	**1.3**	**0.930**
18.	**-2.1**	**0.0**	**1.9**	**1.9**	**0.930**
19.	**-5.6**	**0.5**	**1.3**	**1.5**	**0.931**
20.	**-4.7**	**0.1**	**1.4**	**1.4**	**0.929**
21.	**0.1**	**-4.4**	**1.4**	**1.6**	**0.929**
22.	**-0.5**	**-1.9**	**1.3**	**1.4**	**0.929**
23.	**-2.7**	**1.9**	**1.6**	**1.4**	**0.929**
24.	**-1.6**	**-2.2**	**1.2**	**1.2**	**0.929**
25.	**0.8**	**0.1**	**1.4**	**1.4**	**0.930**

Tablica 10.1: Rezultati površinskih ispitivanja 25 staklenih ploča proizvedenih novom tehnologijom.

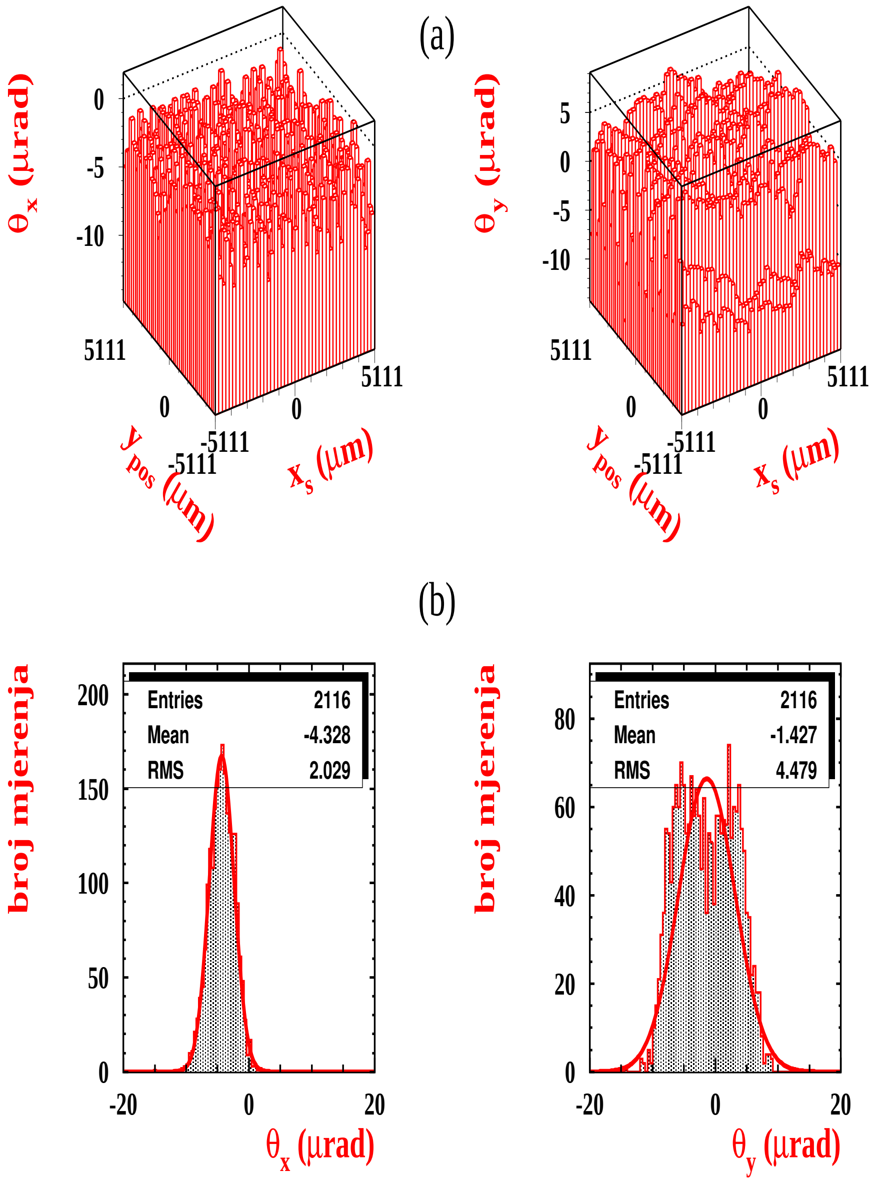
Prosječni kut otklona manji je od 5 μrad, s neodređenošću od 2-3 μrad, uz naglasak da pritom *nisu primijenjene baždarne korekcije*. Postupak rezanja stakla u dijelove dimenzija 20x20 mm^2 i nanošenja silicijskog sloja ne mijenja navedena opažanja. Slika 10.4 prikazuje rezultate površinskog ispitivanja staklene podloge s nanesenim slojem silicija (nije nanesen protu-reflektivni sloj). Podloga je izrezana iz ploče pod rednim brojem 20. Sa slike se vidi da se srednji kut otklona nije bitno promijenio (u usporedbi s vrijednošću navedenom u tablici 10.1. Neodređenost σ_θ je ovdje nešto veća (ali još uvijek unutar 5 μrad). Vjerojatni razlog je utjecaj interferencija, jer na podlogu nije nanesen protu-reflektivni sloj.

Za ovu staklenu podlogu izmjerena je transmitivnost od 85%, što je više od prosječne vrijednosti izmjerene za senzore ALMY II. (Transmitivnost je manja od transmitivnosti staklene ploče jer sloj amorfnog silicija apsorbira dio upadnog laserskog snopa).



Slika 10.3: Raspodjele veličina mjerenih u površinskim ispitivanjima 25 staklenih ploča. Prikazane su raspodjele za (a) prosječni kut otklona laserskog snopa, (b) neodređenost u mjerenju kuta otklona, te (c) transmitivnost laserskog snopa kroz staklo.

Iako je za donošenje konačnih zaključaka potrebna veća statistika mjerenja, preliminarni rezultati upućuju na to da će senzori treće generacije imati odlična optička svojstva, kojima će se između ostalog izbjeći potreba za baždarenjem senzora.



Slika 10.4: Raspodjele kuta otklona laserskog snopa za senzor sa staklenom podlogom poboljšanih svojstava. Prikazane su (a) površinske raspodjele, te (b) jednodimenzionalne projekcije raspodjela iz (a).

10.2 Elektronički sklop

Osim poboljšanih optičkih svojstava, za senzore ALMY III razvija se još i novi elektronički sklop za očitavanje signala. Nove elektroničke pločice su kompaktnije od sadašnjih (dimenzije su 60x60 mm^2, dok su u ALMY II generaciji te dimenzije jednake 80x100 mm^2, vidi sliku 4.3). Na pločicu je ugrađen mikrokontrolerski čip s mogućnošću programiranja. On se može upotrijebiti za pohranu nekih svojstvenih konstanti senzora, kao što su njegova adresa (redni broj), baždarni parametri i sl. To će pojednostaviti računalni program za očitavanje podataka.

Novi sklop je i nešto pouzdaniji. Elektrode na aktivnoj senzorskoj plohi izravno su žicama spojene na analognu pločicu, što rezultira pouzdanijim kontaktima u strujnim krugovima. Također nema potrebe za podešavanjem potenciometara. Naime, razina šuma u senzorima ALMY II mora biti veća od nule da bi postupak oduzimanja šuma bio učinkovit. Ta se razina šuma podešava (mehanički) potenciometrima. U novim senzorima potreba za podešavanjem izbjegnuta je jer je razina šuma podignuta na $\sim$100 ADC jedinica (senzori ALMY II imaju razinu šuma od 10-50 ADC jedinica).

Nema potrebe za reguliranim izvorom napona. Za napajanje može poslužiti i standardni transformator izmjenične struje iz gradske mreže. (Za senzore ALMY II u nekim je slučajevima potrebno precizno namjestiti napon na izvoru, osobito ako je na izvor spojen velik broj senzora.)

Novi elektronički sklop čine isključivo standardne, komercijalno dostupne komponente. To će ubrzati serijsku proizvodnju senzora, te smanjiti troškove proizvodnje.

11

Zaključak

Laserski sustav s optoelektroničkim senzorima ALMY omogućuje precizno mjerenje položaja raznih mehaničkih komponenti. Njegov rad zasniva se na preciznom izravnom mjerenju dvodimenzionalnog položaja laserskog snopa koji prolazi kroz određeni broj poluprozirnih silicijskih senzora, učvršćenih na odgovarajuće mehaničke komponente. Transmitivnost senzorskog materijala od ~82% omogućuje postavljanje i do 10 senzora duž putanje laserskog snopa, pa se tako ostvaruje poravnavanje većeg broja točaka duž pravca (**M**ulti **P**oint **A**lignment, MPA).

Ovakvi sustavi vrlo su bitan sastavni dio nove generacije eksperimenata u fizici visokih energija. Pozicioniranje detektora tragova čestica u tim eksperimentima nije dovoljno stabilno (zbog temperaturnih gradijenata i jakih magnetskih polja), pa mjerenje sagite zakrivljenih tragova čestica (nastalih u sudaru snopova protona ili teških iona) nije dovoljno precizno. Optičkim sustavom za nadzor položaja detektora tragova čestica ostvaruje se željena preciznost.

U ovom je radu detaljno ispitana učinkovitost sustava ALMY. Brojnim laboratorijskim ispitivanjima pokazano je da se senzorima ALMY položaj može mjeriti s preciznošću boljom od 2 μm. Djelomična refleksija unatrag laserskog snopa sa plohe senzora može uzrokovati pogrešno mjerenje položaja, ali u računalnom programu za očitavanje podataka ugrađene su efikasne korekcije ove pojave.

Učinkovitost sustava ALMY ovisi i o dobrom poznavanju smjera laserskog snopa, tj. njegov otklon prolazom kroz senzor mora biti precizno izmjeren. Baždarnim postupkom mjere se parametri koji opisuju ovisnost kuta otklona laserskog snopa o njegovom mjestu upada na površinu senzora. Smjer putanje snopa koji prolazi kroz baždareni senzor poznat je s preciznošću od 2-3 μrad .

Ove su veličine bitno bolje od zahtjeva postavljenih na optički sustav u mionskom spektrometru detektora ATLAS.

Pokazano je da u takvom sustavu moć razlučivanja sagite (nastale pomakom mehaničkih komponenti postavljenih duž jednog pravca) iznosi oko 20 μm. Stoga se pogreške u mjerenju sagite tragova čestica mogu efikasno korigirati.

Rad senzora ispitan je u različitim okruženjima. Preciznost mjerenja položaja ne smanjuje se pod utjecajem osvjetljenja. Moguća je potreba za zaštitom putanje laserskog snopa aluminijskim cijevima, zbog utjecaja temperaturnih gradijenata i zračnih strujanja na pravocrtnost njegove putanje.

Iako je razvoj sustava započeo s ciljem primjene u mionskom spektrometru detektora ATLAS, taj se cilj neće ostvariti, prvenstveno zbog ekonomskih razloga. No, univerzalnost njegovog dizajna omogućuje primjenu u mnogim drugim eksperimentima fizike visokih energija. Tako se trenutno razmatra mogućnost primjene u eksperimentima CMS, ALICE i LHCb, a već je primijenjen u eksperimentu HERA-B, te u probnoj postavi linearnog sudarivača TESLA. Primjena sustava nije ograničena samo na fizikalne eksperimente. Nakon što se ostvari pouzdana serijska proizvodnja senzora, moguća je i njihova primjena u industriji (npr. u proizvodnji automobila, preciznoj izradi složenih uređaja kao što su YaG:Nd laseri i sl.).

Popis slika

Popis tablica

Literatura

[1] S.Glashow, Nucl. Phys. **22** (1961) 579;
S.Weinberg, Phys. Lett. **19** (1967) 1264;
A.Salam, Elementary Particle Theory, W.Svartholm, ed. Almquist and Wiksel, Stockholm, 1968;
H.D.Politzer, Phys. Lett. **30** (1973) 1343

[2] UA1 Collaboration, Phys. Lett. **B122** (1983) 103; **B126** (1983) 398

[3] G.t'Hooft, Nucl. Phys. **B35** (1971) no.1-3, pp.167-188

[4] P.W.Higgs, Phys. Lett. **12** (1964) 132 i Phys. Rev. **145** (1966) 1156;
F.Englert i R.Brout, Phys. Lett. **13** (1964) 321;
G.S.Guralnik, C.R.Hagen i T.W.Kibble, Phys. Lett. **13** (1964) 585

[5] B.W.Lee et al., Phys. Lett. **38** (1977) 883;
M.Quiros, Constraints on the Higgs boson properties from the effective potential, hep-ph/9703412;
A.Ghinculov i T.Binoth, Acta. Phys. Polon. **B30** (1999) 99

[6] G.Altarelli i G.Isidori, Phys. Lett. **B337** (1994) 141;
J.A.Cassas, J.R.Espinosa i M.Quiros, Phys. Lett. **B342** (1995) 171; Phys. Lett. **B383** (1996) 374

[7] B.Grzadkowski i M.Linder, Phys. Lett. **B178** (1986) 81;
T.Hambye i K.Riesselmann, Phys. Rev. **D55** (1997) 7255

[8] ALEPH 99-007 CONF-99-003, March 1999; DELPHI 99-8 CONF-208; L3 Note 2382, 2383, March 1999; OPAL Note PN382, March 1999.

[9] A.N.Okpara, LEP wide Combination of the Search for the Standard Model Higgs Boson, HEP-PH 0105152

[10] J.Wess i B.Zumino, Nucl. Phys. **B70** (1974) 39

[11] LHC White Book, CERN/AC/93-03;
LHC Conceptual Design Report, CERN/AC/95-05

[12] ATLAS Collaboration, Technical Proposal for a General Purpose pp Experiment at the Large Hadron Collider at CERN, CERN/LHCC/94-43, LHCC/P2, 15 December 1994.

[13] CMS-Technical Proposal, CERN/LHCC 94-38, LHCC/P1 15 December 1994.

[14] LHCb Technical Proposal, CERN/LHCC 98-4, 1998.

[15] ALICE Technical Proposal for A Large Ion Collider Experiment at the CERN LHC, CERN/LHCC 95-71, December 1995.

[16] ATLAS TDR 14, CERN/LHCC 99-14, 25 May 1999.

[17] ATLAS Collaboration, Inner Detector Technical Design Report, Volume I, CERN/LHCC/97-16, 30 April 1997.;
ATLAS Collaboration, Inner Detector Technical Design Report, Volume II, CERN/LHCC/97-17, 30 April 1997.

[18] ATLAS Collaboration, Calorimeter Performance Technical Design Report, CERN/LHCC/96-40, 15 December 1996.

[19] ATLAS Collaboration, Muon Spectrometer Technical Design Report, CERN/LHCC/97-22, 31 May 1997.

[20] ATLAS Collaboration, Magnet System Technical Design Report, CERN/LHCC/97-18., 30 April 1997.

[21] G.Marchesini et al., Comp. Phys. Comm. **67** (1992) 465.

[22] F.Paige i S.Protopopescu, Supercollider Physics, p.41, ed.D.Soper (World Scientific)

[23] T.Sjostrand, Comp. Phys. Comm. **82** (1994) 74

[24] The ATLAS muon Group, ATLAS internal Note, MUON-NO-113 (1996);
C.Guyot et al., ATLAS Internal Note MUON-NO62 (1994).

[25] J.R.Bensinger, H.Kroha and A.Ostapchuk, ATLAS Internal Note MUON-NO-168 (1997).

[26] W.Blum, H.Kroha and P.Widmann, Nucl. Instr. Meth. **A367** (1995) 413; Nucl. Instr. Meth. **A377** (1996) 404; IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. **43**, No.3 (1996) 1194; H.Kroha, Nucl. Phys. **B54** (1997) 80

[27] M.F.Garcia, S.Horvat, H.Kroha, A.Ostapchouk, S.Schael, Semitransparent Silicon Strip Sensors for the Precision Alignment of Tracking Detectors, proceedings of the 8^{th} Pisa Meeting on Advanced Detectors, Svibanj 2000; MPI-PhE/2000-012; ATL-COM-MUON-2000-007

[28] F.Bauer, M.F.Garcia, S.Horvat, H.Kroha, A.Ostapchouk and S.Schael, Performance of Semi-Transparent Silicon Strip Sensors for High-Precision Optical Alignment Monitoring Systems, Proceedings of the IEEE 2000 Nuclear Symposium and Medical Imaging Conference, IEEE Transactions on Nuclear Sciences, October 2000, France

[29] HERA-B Technical Design Report, January 1995.

[30] TESLA Technical Design Report, March 2001.

[31] S.Horvat, ALMY:Opto-elektronički senzori u laserskom sustavu za određivanje položaja mionskih komora u sklopu detektora ATLAS, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, PMF-Fizika, 1999.

[32] K.S.Hashemi, J.Bensinger, The BCAM Camera, ATLAS Internal Note, ATL-MUON-2000-024, 15 September 2000.
Hashemi et al., The ATLAS BCAM, ATLAS Note planned for December 2003.

Sažetak

U novoj generaciji detektora tragova čestica javlja se potreba za vrlo preciznim motrenjem relativnih položaja detektorskih komponenti. Na primjer, u mionskom spektrometru detektora ATLAS (koji će biti izgrađen u sklopu projekta LHC) potrebna preciznost mjerenja sagite zakrivljenih tragova miona (duljine i do 15 m) iznosi 30 μm. Tu je preciznost moguće ostvariti korekcijama relativnih pomaka detektorskih komponenti, koje će se mjeriti optičkim sustavom za nadzor položaja.

Za ovu je namjenu razvijen novi optički sustav visoke preciznosti mjerenja položaja (sustav ALMY). Čine ga kolimirani laserski snopovi koji prolaze kroz određeni broj poluprozirnih optičkih senzora na bazi amorfnog silicija. Senzorima se precizno mjeri dvodimenzionalni položaj laserskog snopa.

Visoki koeficijent transmisije ($\sim$82%) omogućuje postavljanje do 10 senzora duž putanje laserskog snopa. Brojnim laboratorijskim ispitivanjima senzora pokazana je moć razlučivanja položaja bolja od 2 μm, uz aktivnu površinu mjerenja od 20x20 mm^2. Neodređenost u kutu otklona laserskog snopa smanjuje se baždarenjem senzora, te iznosi 2-3 μrad. Upotrebom kvalitetno izrađenih staklenih podloga (izrazito paralelnih ploha) pri izradi senzora neodređenost će se još više smanjiti, te neće biti potrebno baždarenje senzora.

Ispit učinkovitosti sustava ALMY pokazuje da sustav zadovoljava zahtjeve za primjenu u mionskom spektrometru detektora ATLAS.

Summary

Modern large-area tracking detectors require increasing precision for the monitoring of the relative positions of the detector components. For example, for the muon spectrometer of the ATLAS experiment at LHC, missalignment corrections of the track curvature have to be provided with an accuracy of 30 μm (r.m.s.) by an optical alignment system over distances of up to 15 m.

A novel high-precision optical alignment monitoring system (*ALMY system*) has been developed for such applications. It uses collimated laser beams shining through the semi-transparent silicon strip sensors. The sensors provide an accurate two-dimensional measurement of the laser beam position.

The high transmittance of $\sim$82% allows the alignment of more than 10 sensors along the laser beam. A position resolution of 2 μm over an area of 20x20 mm^2 has been demonstrated in numerous laboratory tests. The uncertainty in the refraction of the traversing laser beam is reduced to less than 3 μm via the sensor calibration. By using the high-quality polished parallel glass wafers for the sensor fabrication, even smaller uncertainties will be achieved in future (without any need for the calibration procedure).

The required accuracy of such a system for the application in the muon spectrometer of the ATLAS detector has been demonstrated.