

Univerzita Karlova v Praze  
Matematicko-fyzikální fakulta

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



Jan Poslušný

### Měření polohově citlivých polovodičových detektorů

Ústav částicové a jaderné fyziky

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Peter Kodyš, CSc.

Studijní program: Obecná fyzika

2006

Na tomto místě bych chtěl především poděkovat RNDr. Petru Kodyšovi, CSc. za vedení své práce, za trpělivost, ochotu a pomoc při jejím vypracování.

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci napsal samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů. Souhlasím se zapůjčováním práce a jejím zveřejňováním.

V Praze dne 10. srpna 2006

Jan Poslušný

# Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>5</b>
<b>2 Principy detekce částic</b>	<b>6</b>
2.1 Dělení a historie . . . . .	6
2.2 Detektorový systém ATLAS . . . . .	7
<b>3 Stripový křemíkový detektor</b>	<b>11</b>
3.1 Princip funkce polovodičových detektorů . . . . .	11
3.2 Stavba SCT modulu . . . . .	12
<b>4 Experimentální pracoviště</b>	<b>14</b>
4.1 Testování modulů . . . . .	14
4.2 Uspořádání pracoviště . . . . .	14
<b>5 Prověření vlastností</b>	<b>16</b>
5.1 Měření . . . . .	16
5.2 Diskuze . . . . .	17
<b>6 Závěr</b>	<b>19</b>
<b>A Příloha</b>	<b>20</b>
<b>Literatura</b>	<b>28</b>

Název práce: Měření polohově citlivých polovodičových detektorů  
Autor: Jan Poslušný  
Katedra (ústav): Ústav částicové a jaderné fyziky  
Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Peter Kodyš, CSc., ÚČJF MFF UK  
e-mail vedoucího: Peter.Kodys@mff.cuni.cz

Abstrakt: Cílem této práce bylo prověření vlastností polohovacího zařízení určeného k jemné manipulaci výstupu laserového paprsku. Toto zařízení je součástí vybudovaného pracoviště určené k testům SCT modulů, jež jsou součástí detektorového systému ATLAS, k testům pomocí silně zaostřeného laserového svazku.

V práci je uvedeno základní seznámí se s principy detekce částic vysokých energií a dále popsán budovaný detektorový systém ATLAS, jež je součástí urychlovače LHC v CERNu. Dále se zabývá konstrukcí a funkcí stripových křemíkových detektorů, jež jsou součástí vnitřního detektoru. Popisuje stav a funkci pracoviště, kde se provádí testování modulů pomocí laseru. Nakonec shrnuje uskutečněný experiment.

Výsledky poukazují na dobrou přesnost polohovacího systému v dané konfiguraci. Po měření byly zjištěny nezapočítané vlivy v experimentu. Možnost způsobení polohovacím zařízením se ukázala dalším měřením jako nepravděpodobná.

Klíčová slova: polohovací zařízení, křemíkový detektor (SCT), laser test

Title: The Measurement of the Position Sensitive Semiconductor Detectors  
Author: Jan Poslušný  
Department: Institute of Particle and Nuclear Physics  
Supervisor: Peter Kodyš, Ph.D. , IPNP  
Supervisor's e-mail address: Peter.Kodys@mff.cuni.cz

Abstract: Main goal of this bachelor thesis is to verify the precision of the position stages, which are determined to the manipulation with the laser beam. This equipment appertains to laboratorial arrangement for the well-focused laser beam testing of the moduls, which are one of the parts of detector system ATLAS.

In this thesis there are the basic introduction to the detection of the heigh-energy particles and the description of the constructed detector system ATLAS at the hadron collider LHC in Cern, of the construction and the function of SCT (one of the parts of inner detector) and of the laboratory for the laser tests. Till at last the realization and the elaboration of the experiment is described.

The results refers to the precision of the position stages. The measurement involved unexpected shifts. Another measurement proved no fault caused by the position stages.

Keywords: position stages, silicon detector (SCT), well-focused laser beam test

# Kapitola 1

## Úvod

V detektorovém systému ATLAS budovaného urychlovače LHC v Cernu je jednou ze součástí vnitřního detektoru křemíkové polovodičové detektory SCT s jednotkou, nazývanou modul. Před zařazením do provozu je nutné učinit mnoho testů, zda dané moduly vyhovují požadavkům. Jedním ze způsobů, jak přeměřit některé parametry, jsou testy pomocí silně zaostřeného laserového paprsku. Kvůli provedení takového zaostření je však potřeba velmi přesného polohování laseru. K tomuto účelu slouží posuvné a rotační stolky, poháněné krokovým motorem. Účelem mé práce bylo zjistit přesnost dané konfigurace polohovací mechaniky.

# Kapitola 2

## Principy detekce částic

Částice jsou objekty mikrokosmu a k jejich detekci a zkoumání používáme nejrůznějších fyzikálních metod a přístrojové techniky. V této kapitole se snažím nastínit základní způsoby, kterými se tohoto dosahuje.

### 2.1 Dělení a historie

Detektory se dle [1] třídí do různých skupin obecně podle těchto kritérií:

- informace, kterou poskytují,
- procesu, které se v nich k detekci využívají,
- druhů částic, které detekují.

První se dělí ještě na ty, které dokáží jen registrovat počty částic (např. *filmové dozimtry*), popř. dokáží určit prostorovou či časovou souřadnici (např. *Geiger-Müllerův čítač*), a na *dráhové komory*, které nějakým způsobem (fotografie aj.) zaznamenávají dráhu částice.

V druhém případě třídíme detektory na přístroje, pracující s *destruktivními* či *nedestruktivními metodami registrace částic*. V prvním případě se nemění identita detekované částice, v případě druhém se mění, v detektoru se částice např. pohltí či přemění na jiné částice. Detekce neutrálních částic je vždy destruktivního typu.

U třetího bodu je největší rozdíl patrný mezi nabitou částicí a částicí neutrální.

Prvním představitelem prvního typu detektorů podle [2] byla *Wilsonova mlžná komora*. Pracuje na tom principu, že se pomocí adiabatického rozpínání náplň (tou mohou být nasycené páry či vzácné plyny), uzavřená v skleněném válci, ochladí pod rosný bod a tím vznikne přesycená pára. Průletem nabitě částice takovým prostorem vznikne množství nabitých částic — kondenzačních jader, na nichž se tyto přesycené páry srazí. Tím vznikne podél dráhy sledované částice množství

drobných kondenzátů makroskopických rozměrů, jež se vhodným způsobem nasvítí a dají se pozorovat či zaznamenat.

Dalším detektorem, jenž je ve své podstatě založen na obdobném způsobu jako *komora mlžná*, ale opačném, je *bublínková komora*. Náplň zde tvoří přehřátá kapalina, která je zahřátá na vyšší teplotu, než je bod varu, ale ještě nepočala vřít. V případě, že takovou substancí proletí opět nabitá částice, vznikne množství iontů. V důledku narušení tohoto nestabilního prostředí se počne vznik mikroskopických bublinek páry, jež mohou přerůst (v případě dostatečného přehřátí) do viditelných rozměrů.

Historicky důležitý je i *Geiger-Müllerův detektor*. Jedná se o vzduchotěsnou komoru, která je naplněna zředěným plynem, jsou v ní vloženy dvě elektrody, na které je přivedeno vysoké napětí. Proletí-li mezi elektrodami nabitá částice, vznikne opět množství iontů, které jsou dle polaritý přitahovány k elektrodám. Urychlení těchto iontů je dostatečné k tomu, aby cestou ionizovali další částice zředěného plynu a to probíhá lavinovitě dál. Tím vzniká značně silný proudový impuls, který je snadno detekovatelný.

U polovodičové detektorů se využívá toho, že při přiložení jednoho typu polovodiče k druhému dojde v úzkém dotykovém pásu k rekombinaci nositelů náboje. Tato aktivní vrstva se dá ještě zvětšit přiložením napětí v závěrném směru. Nyní pokud proletí nabitá částice touto vrstvou, dojde ke vzniku náboje, který se dá sbírat (více v 2.1).

K zaznamenávání přímo energie proletující částice se používá detektor zvaný *kalorimetr*. Energii měří tím způsobem, že pohltí veškerou energii částice — procházející částice při nárazu produkuje tzv. spršku (v absorbátoru — většinou materiál podpořující vznik a rozvoj spršky), jež jsou vzniknuvší méně energetické částice (elektrony, fotony, protony, atd.). Energie původní částice je úměrná energii pohlcené v celém objemu spršky (pomocí aktivního materiálu, zajišťující zachycení vzniklého signálu). *Kalorimetr* se dělí na elektromagnetický, v kterém dochází k pohlcení elektronů a fotonů, a na hadronový, jenž měří energii protonů, neutronů a dalších těžkých částic.

V dnešní době se mnoho způsobů detekce používá v menší míře a ve velkých experimentech (jakým jsou např. LHC, ATHENA...) se využívá značně komplikovaných detektových komplexů (jako např. u LHC je ATLAS).

## 2.2 Detektorový systém ATLAS

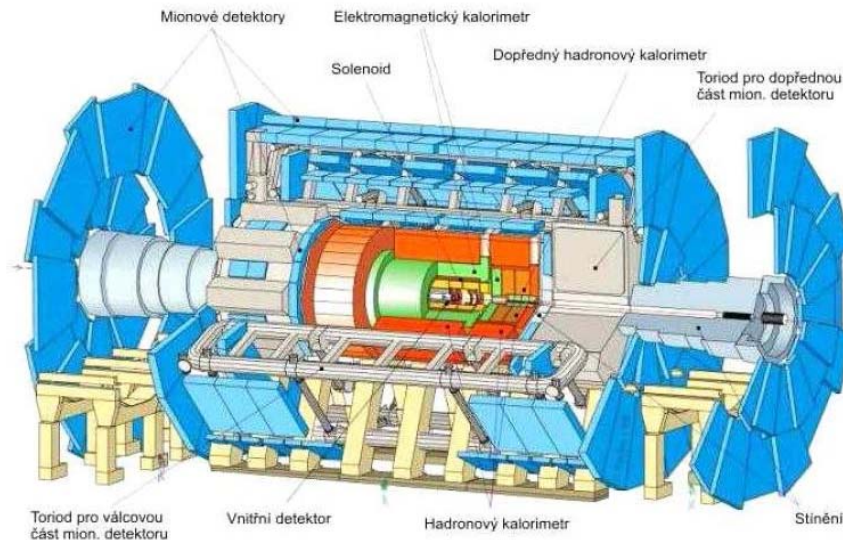
Jedním z detekčních systémů urychlovače LHC (*Large Hadron Collider*), který se buduje (plánované dokončení v roce 2007) na místě demontovaného urychlovače LEP v CERNu, je ATLAS (*A Toroidal LHC ApparatuS*), jež je největším experimentem částicové fyziky.

Je určený k detekci částic vzniklých při inelastických srážkách vstřícných svazků

$pp$  o energii 14 TeV a vyšších. Celý komplex je válcově symetrický, dlouhý 44 m a vysoký 22 m, s celkovou hmotností téměř 7000 tun, jehož plánovaná životnost je 10 let [4]. Dělení systému na další části je znázorněno na obrázku 2.1.

## Vnitřní detektor

Nejblíže bodu srážky se nachází vnitřní detektor. S velkou přesností proměří dráhu nabitých částic (alespoň 6 bodů s přesností asi  $20 \mu\text{m}$ ). Skládá se ze tří částí — křemíkových pixelových detektorů, křemíkových stripových detektorů (*SCT* — *Semiconductor Tracker*) a detektorů přechodového záření (*TRT* — *Transition Radiation Tracker*) v sousém uspořádání. Pixelové detektory jsou tvořeny křemíkovými destičkami rozdělenými na detekční segmenty (pixely) o rozměrech  $50 \times 400 \mu\text{m}^2$ . Signál z každého segmentu je samostatně zpracováván a vyhodnocován. To umožňuje pixelovým detektorům perfektního rozlišení ve všech 3 souřadnicích. Stripové křemíkové detektory, umístěné dále, mají detekční segmenty ve tvaru proužků (stripů) o délce 12 cm a rozteči 80 mikrometrů, určují jen 2 přesné souřadnice. Stripy jednotlivých stran detekčního modulu jsou však vůči sobě pootočené, a tak lze méně přesně určit i třetí souřadnici. Detektor přechodového záření je tvořen soustavou trubek z kovu plněných xenonem, obklopeny materiálem způsobující vznik přechodového záření. Plyn v trubicích převádí fotony přechodového záření na elektrický signál a ten se pak sbírá na centrální elektrodě, což je drát s přiloženým vysokým napětím umístěný v ose trubice.



Obrázek 2.1: Detektorový systém ATLAS (převzato z [6])



## Kalorimetr

K zaznamenání energie prolétávajících částic jsou určeny kalorimetry. Oproti jiným detektorům se s rostoucí energií jejich rozlišení zlepšuje. Jsou vhodné tedy jako detektory při vysokých energiích. Dělí se na elektromagnetický a hadronový. Podstatným úkolem je zjišťovat nerovnováhu rozdělení energie (resp. hybnosti) v příčné rovině, jež poukazuje na nějaké neinteragující neutrální částice, většinou neutrina, a na jejich směr.

## Mionový spektrometr

Základ mionového spektrometru tvoří hliníkové trubky naplněné speciální směsí plynu. Jedná se o tzv. driftové detektory (*MDT — Monitored Drift Chamber*). Další částí jsou rychlé proporcionální komory s katodou segmentovanou na proužky (*CSC — Cathode Strip Chambers*).

## Magnetický systém

K uskutečnění měření hybností produktů srážek je nutno ovlivňovat dráhu částic pomocí magnetického pole. V našem případě se jedná o prostor o velikosti  $8000 \text{ m}^3$ . Magnetický systém ATLASu se skládá ze solenoidu a tří systémů toroidů se vzduchovým jádrem (*air-core toroids*).

Solenoid produkuje magnetické pole o celkové velikosti 2 T. Nachází se ve válcovém elektromagnetickém kalorimetru, v jehož kryostatu je supravodivá cívka solenoidu. Ta je navinuta v jedné vrstvě na vnitřek nosného válce s poloměrem 1,23 m a délce 5,3 m.

Systém supravodivých toroidů se skládá z válcové části (*barrel*) a dvou koncových částí (*end-cap*), přiložených na každém konci válcové části. Válcový toroid je dlouhý 25 m s vnějším poloměrem 20 m a vnitřním 10 m. Koncový toroid je dlouhý 5 m s vnitřním průměrem 1,7 m a vnějším 11 m. Každý toroid se skládá z osmi plochých cívek symetricky uspořádaných kolem osy svazku. Systém toroidů obsahuje dohromady 82 km supravodivého kabelu a navržený pracovní proud je 20,5 kA.

Celý magnetický systém váží 1400 tun, z čehož polovina je tvořena chladícím systémem, jehož chladícím médiem je tekuté helium o teplotě 4,8 K ( $-268 \text{ °C}$ ) [3].

## Trigger, DAQ a DCS

V důsledku velkého objemu dat, jež nelze ani v dnešní době uložit k pozdějšímu nahlednutí a zpracování, je potřeba tyto data nějakým způsobem filtrovat. K tomu slouží *trigger*, jež je rozdělen na tři úrovně. Na *trigger* navazuje DAQ (*Data Acquisitions*), což je systém, který naměřené údaje z jednotlivých subdetektorů vyčítá

a zapisuje do počítače. Ještě obstarává nastavení parametrů detektorů, synchronizaci, kalibraci a další. Teplota, magnetické pole a jiné podmínky panující v systému jsou kontrolovány pomocí DCS (*Detector Control System*). Toto vše je známo pod pojmem *Online Software*.

# Kapitola 3

## Stripový křemíkový detektor

### 3.1 Princip funkce polovodičových detektorů

Ve IV.A skupině periodické soustavy prvků se nacházejí polovodiče. Jak zařazení napovídá, jejich valenční vrstva obsahuje čtyři elektrony. Díky malé šířce zakázaného pásu stačí valenčním elektronům energie tepelného pohybu, aby se dostaly do vodivostního pásu. Tím vznikne volné místo (*díra*), kam může přeskočit jiný valenční elektron a díra se tak efektivně pohybuje.

Rozlišujeme vlastní polovodiče, což jsou polovodiče bez nečistot a příměsí. Ty se moc nepoužívají, protože dosáhnout dostatečné čistoty je obtížné. Nevlastními (příměšovými) polovodiči nazýváme materiály s přidanými atomy prvku, který má jiný počet valenčních elektronů. Pokud přebývají, jedná se o donory, při nedostatku mluvíme o akceptorech. Podle typu příměsí je rozlišujeme na polovodiče typu  $n$  s převážně elektronovou vodivostí a na polovodiče typu  $p$  s dominantní vodivostí děrovou. Pokud je dopování příměsí velké, označujeme materiály symbolem  $n^+$ , resp.  $p^+$ . Přítomnost příměsí v polovodiči se projeví vznikem energetických hladin v zakázaném pásu a změnou Fermiho energie.

Rozlišujeme několik způsobů, jak se valenční elektron dostává do vodivostního pásu. Už zmíněnou možností je *tepelná excitace*, u které není zapotřebí budícího impulsu a dochází k ní již za pokojové teploty. Tento jev způsobuje šum, proto je nutné některé polovodičové detektory s malou šířkou zakázaného pásu chladit. Dále při *optické excitaci* dochází k absorpci fotonu a tím vzniku páru elektron–díra, jež je základem fotodiody a solárního článku. Při průletu nabitě částice dochází k *ionizaci* a vzniku velkého množství párů elektron–díra, úměrné energii částice (až na částice urychlené na relativistické energie — tehdy ionizace téměř nezávisí na energii). Při přiloženém dostatečném napětí dochází k urychlení elektronů v polovodiči a ty pak vytváří nové elektron–děrové páry, dochází k *multiplikaci*. Rekombinací pak nazýváme zánik páru.

K detekci záření se převážně používají vyprázdňené p–n přechody. To je místo spojení polovodičů s opačným dopováním. V této oblasti difundují elektrony z  $n$  do  $p$ , díry naopak a dochází k rekombinaci. Díky tomu se v bezprostřední blízkosti nevyskytují téměř žádné volné nosiče náboje. Dochází k nerovnoměrnému rozmístění náboje a vzniku elektrického potenciálu  $V_i$  (*vnitřní napětí*). Tuto oblast lze ještě zvětšit přiložením napětí v závěrném směru. I v této vyprázdňené oblasti dochází k vzniku elektron–děrových párů a kvůli přiloženému napětí nedojde k rekombinaci. Elektrony a díry *driftují* a vzniká zpětný proud (*leakage current*).

K tomu, aby jsme dosáhli vysokého prostorového rozlišení, se využívá segmentovaných elektrod. Používá se členění na malé obdélníky (*pixely*) či proužky (*stripy*) mikroskopické velikosti (řádově mikrometry).

Stripové křemíkové detektory použity ve vnitřním detektoru jsou tzv. p-i-n typu, což znamená, že  $p^+$  stripy s šířkou  $18 \mu\text{m}$  jsou přichyceny na destičku z čistého materiálu typu  $n$ . Na opačnou stranu se ještě přidává vrstvička  $n^+$  a tím se zmenší počet minoritních nositelů náboje. Poslední vrstvou je  $1 \mu\text{m}$  tenký hliníkový kontakt na  $p^+$  stripech a  $n^+$  vrstvě (je to kvůli dobré elektrické permitivitě).

Více o problematice polovodičových detektorů viz. [5].

## 3.2 Stavba SCT modulu

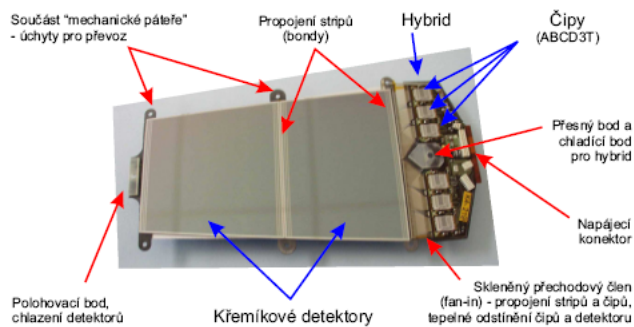
Základním prvkem SCT je detekční modul (viz. obr. 3.1), jež je součástí vnitřního detektoru, dělí se na dopřednou a válcovou část. Ty jsou složeny z pěti typů modulů (jeden pro válcovou a čtyři pro dopřednou část [6, 7]).

Po obou stranách modulu jsou přesně připevněny dva nebo čtyři křemíkové detektory o rozměrech  $6 \times 6 \text{ cm}^2$ . Detektory jsou připevněny stranami bez stripů k sobě a jsou vzájemně pootočený o úhel  $40 \text{ mrad}$ . Toto uspořádání umožňuje s dostatečnou přesností proměření i radiální souřadnice prolétávající částice. U modulů se čtyřmi detektory jsou stripy dvou detektorů vprostřed vodivě propojeny drátky (*bondy*) o tloušťce  $25 \mu\text{m}$ , a tak na každé straně vzniká 768 aktivních detekčních segmentů efektivní délky  $12 \text{ cm}$ . Tato stavba je podmíněna technologickými obtížemi výroby destičky dané velikosti z dostatečně čistého křemíku.

Kostra modulu je ze speciálního grafitu, zajišťující dostatečnou pevnost a odvod tepla od detektorů. Dále má i velkou radiační délku, tedy energie částice se po průletu téměř nezmění.

Na okraji je připojen elektronický hybrid s 12 vyhodnocovacími čipy (a obvody pro rozvod signálů, nízkého a vysokého napětí a konektory pro spojení s další elektronikou). Ty umožňují kalibraci, jemné nastavení prahu pro každý strip zvlášť (*trimming*), ukládají informaci o zásahu stripu v posuvném registru (*pipeline*) po dobu dalších 256 srážek (3 mikrosekund). Signály z detekčních stripů jsou snímány v rytmu srážek každých  $25 \text{ ns}$  a porovnávány s nastavenou prahovou

hodnotou (*threshold*). Při překročení se zaznamená 1, jinak 0. Informace o amplitudě signálu se oproti analogovému vyčítání nezaznamenává, překročilo by to únosnou mez množství objemu dat. V případě, že trigger vyhodnotil tuto srážku jako zajímavou, jsou data odeslána po optických vláknech dále k zpracování.



Obrázek 3.1: Popis částí end-cup modulu (převzato z [6])

# Kapitola 4

## Experimentální pracoviště

### 4.1 Testování modulů

Mnoho parametrů detektorů je třeba před začleněním do systému ověřit. Některé lze získat pomocí vnitřního kalibračního pulsu. Mnohé lze však proměřit jen pomocí náboje generovaného vnějším pulsem. To může být například svazek vysokoenergetických částic. Zde však je nepříjemné, že ten je možno získat jen na větších urychlovačích v určité době a ještě je toto značně finančně nákladné. Proto je snaha nalézat alternativy. Jedním z nich je například velmi časté použití beta zářičů, které ovšem má své nedostatky (např. široké energetické spektrum a nemožnost pozičního proměření).

Další alternativou je testování pomocí silně zaostřeného laserového svazku, [8]. Ten přináší velkou výhodu zejména v časovém a prostorovém měření, se stejnorodým energetickým pulsem. Musí se však vzít v úvahu rozdílný princip interakce s detektorem, než jaký je u částic.

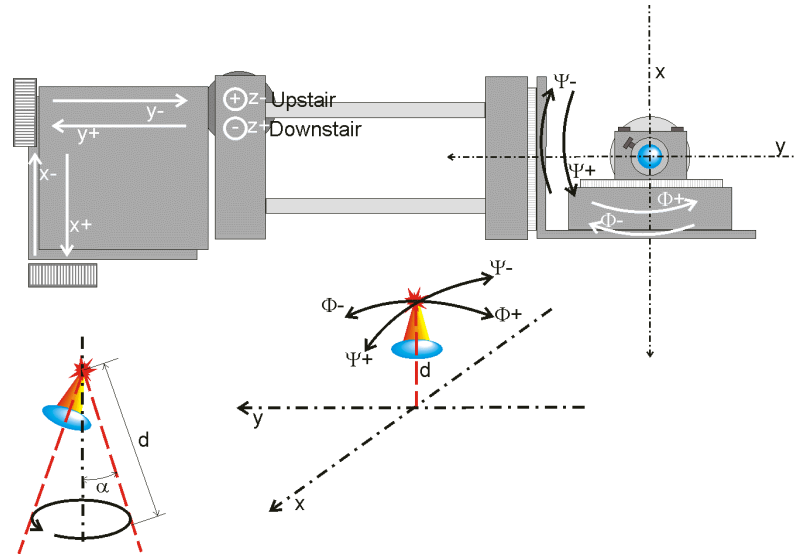
### 4.2 Uspořádání pracoviště

K proměření reflektivity silikonových stripů byla vybudována soustava s následující konfigurací. V železné konstrukci je připoután testovaný modul uchycený v rámečku. Pod ním se nachází výstup optického vlákna vedoucí laserový paprsek na konci opatřeného čočkou. Umístění v prostoru zabezpečují tři posuvné stolky, jež obstarávají pohyb ve směru os  $x$ ,  $y$ ,  $z$  a dále dva rotační, které naklánějí osu  $z$  v rovině  $xz$  o úhel  $\Psi$  a v rovině  $yz$  o úhel  $\Phi$ . K rotačnímu stolku, který vychyluje osu  $z$  v rovině  $yz$ , je přichycena duralová trubice, sloužící k upevnění vlákna laseru. Celá soustava je schematicky znázorněna na obrázku 4.1.

Toto vše je umístěno v *black boxu*, což je železná schránka, uzemněná a zabraňující kontaminaci s okolními vlivy (např. světelné záření), o rozměrech  $1 \times 0,8 \times 11$  m. Vnitřek je naplněn dostatečně suchým vzduchem (aby nebylo dosaženo rosného

bodů), a vše je chlazeno na  $-20^{\circ}\text{C}$  nebo  $15^{\circ}\text{C}$ . *Black box* se nachází v čisté místnosti. Parametry použitých laserů lze nalézt na [9].

Polohovací zařízení je výrobkem 8MT167-25 firmy Standa Ltd. Jedná se o stolek, jehož pohyb obstarává bipolární krokový motor, s krokem  $1,25\ \mu\text{m}$ , se schopností se pohybovat až o  $1/8$  kroku. Při bipolárním řízení prochází proud vždy dvěma protilehlými cívkami. Ty jsou zapojené tak, že mají navzájem opačně orientované magnetické pole. Více o problematice krokových motorů na [10], [11].



Obrázek 4.1: Schematické znázornění polohovacího zařízení (s dovolením RNDr. Petra Kodyše, CSc.)

# Kapitola 5

## Prověření vlastností

K prověření přesnosti polohovacího zařízení byl navržen následující experiment.

Pomocí laseru a detektoru se zjistila přesná pozice stolku, který se poté posunul v určitém směru, vrátil se zpět a zjistila se změna jeho nové polohy vůči původní. Toto bylo možné učinit díky tomu, že stripy detektoru jsou pokryty vrstvičkou hliníku, který většinu laserového paprsku odrazí. Na hraně stripu tedy dochází k prudkému nárůstu kolektovaného náboje v detektoru. Jen nepatrná změna polohy představuje značný nárůst sbíraného náboje. Pozičně citlivé je toto měření však jen v jednom směru. Proměřili jsme tedy v geometrii obr. 4.1 jen osu  $y$ , u ostatních stolků vliv pohybu těchto stolků na pozici ve směru  $y$ . Ještě se též overoval vliv softwarem nabízené kompenzace hystereze celého mechanického uspořádání.

### 5.1 Měření

Před měřením bylo nutno sečkat z důvodu chlazení celého systému na pracovní teplotu. Poté se inicializovala všechna přístrojová technika ukrytá v *black boxu*. Měření bylo prováděno pomocí programu SCT DAQ, jež obstarával jak pohyb polohovacího zařízení ve všech potřebných směrech, tak i zjištění polohy. Každá akce se zapisovala v takovémto tvaru do souboru:

```
...
...
date 20060714, time 110634 , Module-specific DCS-Information:
Module      Vcc  Icc  Vdd  Idd  Vdet  Idet  Thyb1 Thyb2
laserCiS000005 3.50 1120 4.00 570 150.0 8.28 36.00 -128.00
Response median of strip under laser +-1:
Hysteresis compensation: 0
Signal: Strip 494 median 272.5553 , Strip 495 median 452.1178 , Strip 496 median 256.5941
Bkgr: Strip 494 median 269.6362 , Strip 495 median 266.1983 , Strip 496 median 249.6833
Positions:
dev 0 , pos      296320 in microsteps, 46299.99897 in um
dev 1 , pos      -92 in microsteps,  -13.75000 in um
dev 2 , pos       548 in microsteps,   85.00000 in um
dev 3 , pos      -28 in microsteps, -30.00000 in um
dev 4 , pos      -28 in microsteps, -30.00000 in um
```



```

date 20060714, time 110913 , Module-specific DCS-Information:
Module      Vcc  Icc  Vdd  Idd  Vdet  Idet  Thyb1  Thyb2
laserCiS000005 3.50 1120 3.98 570 150.0 8.29 36.00 -128.00
Moving of position stages:
Hysteresis compensation: 0
Dev: 0 Shift:      1280 microsteps,  200.0000 um
Positions:
dev 0 , pos      296324 in microsteps, 46299.99897 in um
dev 1 , pos       -92 in microsteps,  -13.75000 in um
dev 2 , pos       548 in microsteps,   85.00000 in um
dev 3 , pos      -28 in microsteps,  -30.00000 in um
dev 4 , pos      -28 in microsteps,  -30.00000 in um
...
...

```

kde první odstavec představuje polohu a druhý posun v daném směru. Poté se vyseparovali potřebné údaje (pomocí sepsaného triviálního programu v C), kterými byli datum, čas, medián<sup>1</sup> stripu 495<sup>2</sup>, kompenzace hystereze<sup>3</sup>, číslo stolku (Dev) a posun (Shift) v daném směru. Tyto data jsou zobrazeny v tabulkách A.2 – A.5. Ostatní data obsažená ve výstupním souboru jen ověřovali korektnost a stabilitu měření.

Naměřené hodnoty mediánu sledovaného stripu se přepočítali na vzdálenost v mikrometrech (uvedeno v tabulkách A.2–A.5 spolu s naměřenými hodnotami; výchylnka představuje změnu předchozí polohy v danou polohu) podle daných kalibračních křivek, získaných pomocí funkce „Fine scan in focus“ v SCT DAQ. Tyto křivky vznikly vynášením mediánu daného stripu vzhledem k posunu laseru (ukázky takové křivky je možné nahlédnout na obrázcích A.1 a A.2). Z těchto hodnot se pak stanovil průměr vychýlení a směrodatná odchylka. Tyto výsledky shrnuje tabulka A.1.

## 5.2 Diskuze

Tabulka získaných výsledků ukazuje, že průměrná hodnota změny polohy je vždy menší než hodnota polovičního kroku motorku, většinou však je menší než pětina kroku. Chyba těchto hodnot jen jednou přesahuje hodnotu kroku (což je 1,25  $\mu\text{m}$ ), a to u stolku  $z$ , kde se jedná o hodnotu 2,4  $\mu\text{m}$ .

Některé naměřené hodnoty však poukazují na odchylky, které nebyly předpokládány. Poukazují na to dvě kalibrační křivky, naměřené na začátku a konci jednoho dne (viz. obrázky A.3 a A.4 – minimum by mělo mít stejný tvar, jelikož nedošlo ke změně škálování). To mohlo být zapříčiněno buď nestabilitou stolků, změnou ve vyčítací mechanice detektoru či kolísání výkonu laseru. První možnost je nepravděpodobná již z toho důvodu, že se proměřila poloha pro jednu pozici, kdy nebylo

<sup>1</sup>mediánem daného kanálu se označuje hodnota prahového napětí, při kterém dojde k zaznamenání 500 událostí z 1000

<sup>2</sup>libovolně pevně zvolený kanál

<sup>3</sup>hodnota 1 představuje zapnutou kompenzaci, hodnota 0 vypnutou

posunováno žádným stolkem (ty byly přímo vypnuté) a přesto taková situace byla pozorována. Druhá možnost je nemožná, jelikož se na tomto modulu již delší dobu provádějí stabilní měření. Tedy přichází v úvahu kolísání výkonu laseru, přestože tak značné kolísání je mimo garantovaný rozsah. Je však také ještě možné, že došlo k mírné defokusaci laserového paprsku, a tím pádem mohlo dojít ke změně odrážené části energie pulsu na hliníkové části stripu, a tím pádem ke změně detekovaného signálu.

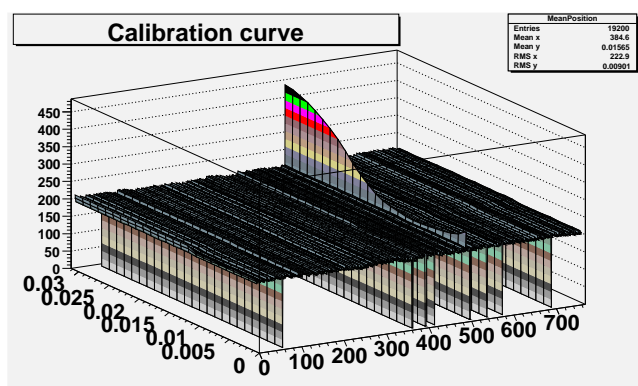
# Kapitola 6

## Závěr

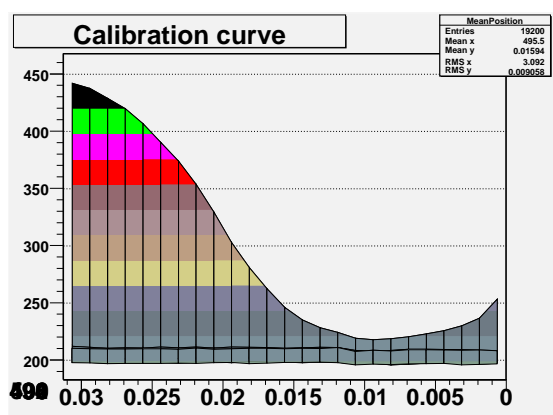
Výsledky získané v tomto měření mají v jiných směrech než ve směru osy  $y$  převážně spíše orientační charakter. K přesnému proměření by bylo třeba změnit geometrii polohovacího systému – detektoru, aby se dal též zjistit vliv na výchylku ve směru osy  $x$ . Pro směr osy  $z$  by bylo zapotřebí přesně zjistit vliv fokusace. Při dané konfiguraci přesnost rotačních stolků je hůře podchytitelná.

Můj přínos byl v prodiskutování návrhu, jakým způsobem uskutečnit měření. Dále jsem proměřil výchylku z původní polohy při posunu všech stolků polohovacího systému a získaná data zpracoval. Po shlednutí některých nesrovnalostí jsem proměřil polohu při vypnutých stolcích, a tím jsem vyloučil možnost změny tvaru kalibrační křivky z důvodu nepřesnosti polohovacího zařízení. Ve většině případů jsem ověřil dostatečnou přesnost polohovacího systému.

# Příloha A



Obrázek A.1: Kalibrační křivka z dne 31. 7. 2006



Obrázek A.2: Detail kalibrační křivky

osa stolku	posun [ $\frac{1}{8}$ kroku]	posun [mm]	kompensace hystereze	výchylka [ $\mu\text{m}$ ]
x	1280	0,2	0	$-0,36 \pm 1,10$
	-1280	-0,2	0	$-0,15 \pm 0,92$
	6400	1,0	1	$0,30 \pm 1,12$
	-6400	-1,0	1	$0,05 \pm 0,62$
	6400	1,0	0	$0,21 \pm 0,94$
	-6400	-1,0	0	$0,18 \pm 1,11$
	1280	0,2	1	$-0,04 \pm 0,91$
	-1280	-0,2	1	$0,08 \pm 0,67$
y	1280	0,2	0	$0,17 \pm 0,74$
	-1280	-0,2	0	$-0,07 \pm 0,47$
	1280	0,2	1	$0,24 \pm 0,18$
	-1280	-0,2	1	$0,14 \pm 0,29$
	6400	1,0	0	$0,47 \pm 0,25$
	6400	1,0	1	$0,19 \pm 0,31$
	64000	10,0	0	$0,20 \pm 0,81$
	64000	10,0	1	$-0,10 \pm 1,11$
	96000	15,0	0	$0,01 \pm 0,23$
96000	15,0	1	$-0,19 \pm 1,00$	
z	1280	0,2	0	$-0,24 \pm 1,22$
	-1280	-0,2	0	$0,03 \pm 0,03$
	1280	0,2	1	$0,04 \pm 0,22$
	-1280	-0,2	1	$0,07 \pm 0,11$
	6400	1,0	0	$0,07 \pm 0,63$
	-6400	-1,0	0	$0,21 \pm 1,17$
	6400	1,0	1	$-0,20 \pm 2,40$
	-6400	-1,0	1	$0,28 \pm 0,90$
$\phi$	800	1,0	0	$0,04 \pm 0,06$
	-800	-1,0	0	$0,00 \pm 0,10$
	800	1,0	1	$0,30 \pm 0,38$
	-800	-1,0	1	$0,18 \pm 0,25$
	4000	5,0	0	$0,07 \pm 0,12$
	-4000	-5,0	0	$0,05 \pm 0,10$
	4000	5,0	1	$0,03 \pm 0,09$
	-4000	-5,0	1	$-0,03 \pm 0,14$
$\psi$	800	1,0	0	$0,02 \pm 0,26$
	-800	-1,0	0	$-0,09 \pm 0,42$
	800	1,0	1	$0,06 \pm 0,24$
	-800	-1,0	1	$0,06 \pm 0,18$
	4000	5,0	0	$0,45 \pm 0,24$
	-4000	-5,0	0	$0,33 \pm 0,24$
	4000	5,0	1	$0,24 \pm 0,40$
	-4000	-5,0	1	$0,16 \pm 0,33$

Tabulka A.1: Tabulka shrnující výsledky

datum	posun [ $\frac{1}{8}$ kroku]	kom. hyst.	čas	naměřená poloha [mV]	přepočtená poloha [ $\mu\text{m}$ ]	výchylka [ $\mu\text{m}$ ]
20060714	1280	0	14:05:50	469,309113	21,697712	
20060714	1280	0	14:08:22	467,656189	21,586264	-0,111
20060714	1280	0	14:11:35	469,986511	21,743385	0,157
20060714	1280	0	14:14:31	472,260712	21,896725	0,153
20060714	1280	0	14:17:17	471,150696	21,821882	-0,075
20060714	1280	0	14:20:10	472,535889	21,915279	0,093
20060714	1280	0	14:23:11	474,255005	22,031191	0,116
20060714	1280	0	14:26:31	475,489594	22,114433	0,083
20060714	1280	0	14:29:15	474,585297	22,053461	-0,061
20060714	1280	0	14:32:05	476,550995	22,185999	0,133
20060714	1280	0	14:34:53	480,285797	22,43782	0,252
20060714	1280	0	14:46:20	360,080811	27,382015	
20060714	1280	0	14:49:57	330,855286	26,326302	-1,056
20060714	1280	0	14:52:42	328,048615	28,707777	2,381
20060714	-1280	0	14:52:42	328,048615	28,707777	
20060714	-1280	0	14:55:50	325,590393	28,558300	-0,149
20060714	-1280	0	14:58:58	441,956299	22,920404	
20060714	-1280	0	15:02:04	464,623596	21,381788	-1,539
20060714	-1280	0	15:05:12	464,620392	21,381573	0,000
20060714	-1280	0	15:07:29	464,615601	21,381250	0,000
20060714	-1280	0	15:09:54	464,338806	21,362587	-0,019
20060714	-1280	0	15:12:40	467,791809	21,595407	0,233
20060714	-1280	0	15:15:36	472,673889	21,924583	0,329
20060714	-1280	0	15:17:46	470,478485	21,776558	-0,148
20060714	-1280	0	15:20:52	475,551086	22,118580	0,342
20060714	-1280	0	15:24:30	475,542603	22,118008	-0,001
20060714	-1280	0	15:26:45	471,471313	21,843500	-0,275
20060714	-1280	0	15:28:57	470,191711	21,757221	-0,086
20060714	-1280	0	15:32:11	475,645905	22,124973	0,368
20060721	6400	0	12:47:48	303,527710	15,040071	
20060721	6400	0	12:49:59	325,706390	16,045742	1,006
20060721	6400	0	12:51:22	334,578796	16,458054	0,412
20060721	6400	0	12:52:46	339,837189	16,708530	0,250
20060721	6400	0	12:54:09	349,752411	17,180826	0,472
20060721	6400	0	12:55:55	360,993896	17,769880	0,589
20060721	6400	0	12:57:26	369,121613	18,252937	0,483
20060721	6400	0	12:59:48	380,243988	18,973003	0,720

Tabulka A.2: Ukázka naměřených dat pro stolek  $y$

datum	posun [ $\frac{1}{8}$ kroku]	kom. hyst.	čas	naměřená poloha [mV]	přepočtená poloha [ $\mu\text{m}$ ]	výchylka [ $\mu\text{m}$ ]
20060721	6400	0	13:01:27	384,256989	19,297365	0,324
20060721	6400	0	13:03:46	390,502808	19,802198	0,505
20060721	6400	0	13:05:28	393,021210	20,007006	0,205
20060721	6400	0	13:08:49	399,839600	20,677896	0,671
20060721	6400	0	13:10:23	399,738586	20,667957	-0,010
20060721	6400	1	13:15:32	295,720215	14,696410	
20060721	6400	1	13:17:45	309,162201	15,295562	0,599
20060721	6400	1	13:20:34	319,484100	15,763598	0,468
20060721	6400	1	13:21:58	310,724792	15,366416	-0,397
20060721	6400	1	13:23:28	311,124786	15,384553	0,018
20060721	6400	1	13:24:51	312,592712	15,451115	0,067
20060721	6400	1	13:28:44	328,399811	16,167873	0,717
20060721	6400	1	13:30:23	324,427185	15,987739	-0,180
20060721	6400	1	13:31:48	323,717712	15,955567	-0,032
20060721	6400	1	13:33:24	327,211487	16,113991	0,158
20060721	6400	1	13:35:06	336,423889	16,545942	0,432
20060721	6400	1	13:37:14	341,161713	16,771622	0,226
20060721	6400	1	13:39:22	344,744812	16,942297	0,171
20060721	64000	1	13:41:10	250,828506	12,541105	
20060721	64000	1	13:44:13	251,931702	12,598325	0,057
20060721	64000	1	13:46:49	247,347794	12,288050	-0,310
20060721	64000	1	13:53:04	274,709808	13,775161	
20060721	64000	1	13:57:11	246,818893	12,246349	-1,529
20060721	64000	1	13:59:17	242,500000	11,905828	-0,341
20060721	64000	1	14:01:38	242,806305	11,929978	0,024
20060721	64000	1	14:24:37	229,311600	10,637710	
20060721	64000	1	14:28:12	220,706299	9,161595	-1,476
20060721	64000	1	14:37:23	324,082306	15,972100	
20060721	64000	1	14:40:09	276,551788	13,855927	-2,116
20060721	64000	1	14:43:53	286,806610	14,305573	0,450
20060725	64000	1	10:53:06	300,431213	23,640760	
20060725	64000	1	10:55:23	280,208801	22,895910	-0,745
20060725	64000	1	11:00:00	256,204895	24,261570	1,366
20060725	64000	1	12:48:53	222,751099	17,110027	
20060725	64000	1	12:50:42	219,771194	18,439917	1,330
20060725	64000	1	12:55:14	347,260193	5,3256330	
20060725	64000	1	12:58:54	338,711212	7,2675530	1,942

Tabulka A.3: Ukázka naměřených dat pro stolek  $y$

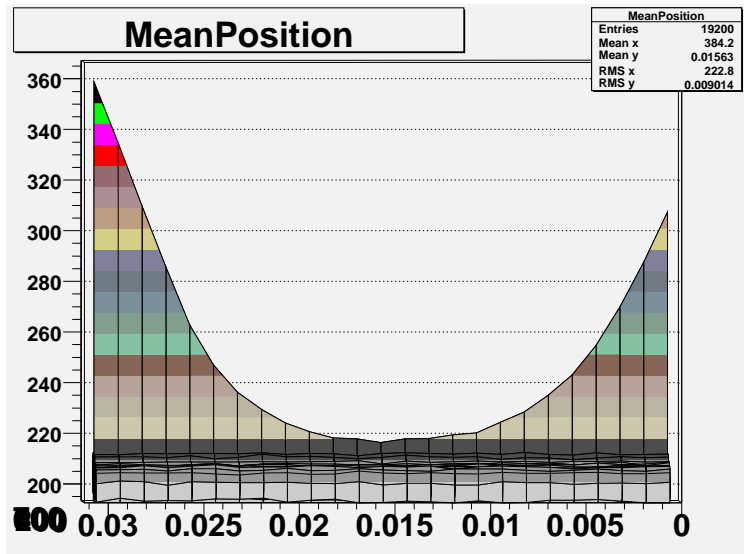
datum	posun [ $\frac{1}{8}$ kroku]	kom. hyst.	čas	naměřená poloha [mV]	přepočtená poloha [ $\mu\text{m}$ ]	výchylka [ $\mu\text{m}$ ]
20060725	64000	1	13:01:08	340,410889	7,379292	0,112
20060725	64000	1	13:03:52	337,787689	7,206840	-0,172
20060725	64000	0	13:03:52	337,787689	7,206840	
20060725	64000	0	13:06:18	339,327911	7,308095	0,101
20060725	64000	0	13:08:45	336,041199	7,092024	-0,216
20060725	64000	0	13:10:46	333,374786	6,916731	-0,175
20060725	64000	0	13:12:32	335,269012	7,041259	0,125
20060725	64000	0	13:14:28	329,735291	6,677467	-0,364
20060725	64000	0	13:16:34	323,028107	8,736774	2,059
20060725	64000	0	13:18:20	318,433807	8,440230	-0,297
20060725	64000	0	13:20:30	314,606293	8,193179	-0,247
20060725	64000	0	13:22:47	310,194885	7,908440	-0,285
20060725	64000	0	13:24:30	311,245087	7,976227	0,068
20060725	64000	0	13:26:16	307,995300	7,766466	-0,210
20060725	64000	0	13:28:15	298,534485	9,644385	1,878
20060725	96000	0	13:28:15	298,534485	9,644385	
20060725	96000	0	13:30:34	296,265411	9,493066	-0,151
20060725	96000	0	13:32:43	295,313507	9,429585	-0,063
20060725	96000	0	13:34:45	298,075989	9,613809	0,184
20060725	96000	0	13:36:55	295,962494	9,472864	-0,141
20060725	96000	0	13:38:51	301,491791	9,841602	0,369
20060725	96000	0	13:41:13	293,823303	9,330206	-0,511
20060725	96000	0	13:43:31	292,958008	9,272502	-0,058
20060725	96000	0	13:45:30	298,071198	9,613489	0,341
20060725	96000	0	13:47:53	296,683197	9,520926	-0,093
20060725	96000	0	13:49:52	296,269592	9,493344	-0,028
20060725	96000	0	13:52:04	299,047089	9,678570	0,185
20060725	96000	0	13:54:12	301,144592	9,818448	0,140
20060725	96000	1	13:56:30	282,524109	11,076166	
20060725	96000	1	13:58:35	284,993988	11,241371	0,165
20060725	96000	1	14:00:55	282,503204	11,074768	-0,167
20060725	96000	1	14:03:02	286,026611	8,810261	-2,265
20060725	96000	1	14:05:10	288,138214	8,951079	0,141
20060725	96000	1	14:07:15	290,373688	9,100159	0,149
20060725	96000	1	14:09:37	285,506897	8,775602	-0,325
20060725	96000	1	14:11:41	286,060089	8,812493	0,037
20060725	96000	1	14:13:56	297,469299	9,57335	0,761

Tabulka A.4: Ukázka naměřených dat pro stolek  $y$

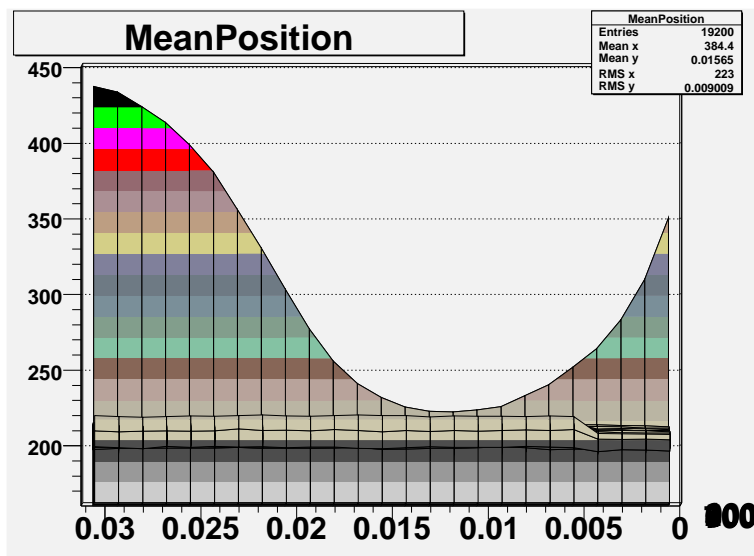


datum	posun [ $\frac{1}{8}$ kroku]	kom. hyst.	čas	naměřená poloha [mV]	přepočtená poloha [ $\mu\text{m}$ ]	výchylka [ $\mu\text{m}$ ]
20060725	96000	1	14:16:20	280,904114	10,967809	1,394
20060725	96000	1	14:18:26	286,822693	8,863350	-2,104
20060725	96000	1	14:20:35	290,526489	9,110349	0,247
20060725	96000	1	14:23:51	285,365906	8,766200	-0,344
20060727	1280	1	12:29:21	387,484009	17,751266	
20060727	1280	1	12:31:51	393,683289	18,192158	0,441
20060727	1280	1	12:34:03	399,845215	18,630392	0,438
20060727	1280	1	12:36:08	404,677612	19,069715	0,439
20060727	1280	1	12:44:04	333,111298	14,796826	
20060727	1280	1	12:46:01	330,548706	14,676044	-0,121
20060727	1280	1	12:47:45	332,478210	14,766987	0,091
20060727	1280	1	12:49:34	339,049500	15,074940	0,308
20060727	1280	1	12:51:14	342,494690	15,233575	0,159
20060727	1280	1	12:53:10	347,938690	15,484247	0,251
20060727	1280	1	12:55:34	354,380402	15,780860	0,297
20060727	1280	1	12:57:15	356,546814	15,880613	0,100
20060727	1280	1	12:59:00	360,736298	16,073521	0,193
20060727	1280	1	13:01:21	369,656311	16,578094	0,505
20060727	1280	1	13:03:49	370,775787	16,650293	0,072
20060727	-1280	1	13:03:49	370,775787	16,650293	
20060727	-1280	1	13:05:36	368,948212	16,532429	-0,118
20060727	-1280	1	13:07:37	371,754486	16,713413	0,181
20060727	-1280	1	13:09:17	372,651489	16,771263	0,058
20060727	-1280	1	13:15:37	387,438599	17,748037	0,977
20060727	-1280	1	13:17:54	381,117188	17,317240	-0,431
20060727	-1280	1	13:19:47	383,035187	17,440937	0,124
20060727	-1280	1	13:21:28	383,088593	17,444382	0,003
20060727	-1280	1	13:23:05	383,472107	17,469116	0,025
20060727	-1280	1	13:24:38	384,306610	17,525291	0,056
20060727	-1280	1	13:26:18	387,275787	17,736458	0,211
20060727	-1280	1	13:28:03	390,018188	17,931498	0,195
20060727	-1280	1	13:29:48	393,368500	18,169769	0,238
20060727	-1280	1	13:31:47	396,286499	18,377296	0,208
20060727	-1280	1	13:33:56	398,778900	18,554556	0,177

Tabulka A.5: Ukázka naměřených dat pro stolek  $y$



Obrázek A.3: Detail kalibrační křivky ze začátku dne 28. 7. 2006



Obrázek A.4: Detail kalibrační křivky z konce dne 28. 7. 2006

datum	čas	naměřená poloha [mV]	přepočtená poloha [ $\mu\text{m}$ ]	výchylka [ $\mu\text{m}$ ]
20060801	9:26:29	283,524	0,000	
20060801	9:29:50	316,911	1,768	1,768
20060801	9:31:23	316,654	1,756	-0,012
20060801	9:32:48	319,638	1,897	0,142
20060801	9:34:14	326,388	2,217	0,320
20060801	9:35:44	338,203	2,813	0,596
20060801	9:37:14	345,240	3,174	0,361
20060801	9:38:44	352,074	3,525	0,351
20060801	9:40:10	357,594	3,849	0,323
20060801	9:41:47	365,222	4,316	0,467
20060801	9:45:05	379,183	5,249	0,933
20060801	9:47:19	375,599	4,976	-0,273
20060801	9:48:57	379,460	5,270	0,294
20060801	9:50:39	381,261	5,407	0,137
20060801	9:52:26	385,099	5,700	0,292
20060801	9:53:58	388,197	5,936	0,236
20060801	9:55:46	392,247	6,247	0,311
20060801	9:58:01	395,979	6,537	0,290
20060801	10:00:13	398,086	6,701	0,164
20060801	10:02:35	401,148	6,939	0,238
20060801	10:19:37	365,867	4,355	-2,583
20060801	10:21:53	359,431	3,961	-0,394
20060801	10:23:49	359,399	3,959	-0,002
20060801	10:25:33	365,675	4,344	0,384
20060801	10:27:16	370,540	4,642	0,298
20060801	10:30:15	382,556	5,506	0,864
20060801	10:32:44	382,369	5,492	-0,014
20060801	10:35:53	381,256	5,407	-0,085
20060801	10:38:50	381,537	5,428	0,021
20060801	10:41:17	383,278	5,561	0,133
20060801	10:43:04	388,116	5,930	0,369
20060801	10:53:08	380,452	5,346	-0,584
20060801	10:54:55	373,306	4,811	-0,535
20060801	10:56:27	367,133	4,433	-0,378
20060801	10:58:10	356,823	3,802	-0,631
20060801	10:59:37	347,509	3,291	-0,511
20060801	11:01:03	346,733	3,251	-0,040

Tabulka A.6: Data z měření jedné polohy bez posunu stolků

# Literatura

- [1] Úlehla, I., Suk M., Trka, Z.: *Atomy, jádra, částice*, Academia, Praha, 1990, 257 s.
- [2] Ullmann, V.: *Detekce a spektrometrie ionizujícího záření*, dostupné na WWW [cit. 8. 8. 2006]: <<http://www.sweb.cz/AstroNuklFyzika/strana2.htm>>
- [3] Ruber, R.J.M.Y.: *ATLAS Magnet System*, 2003, dostupné na WWW [cit. 8. 8. 2006]: <<http://cern.ch/atlas-magnet/info/project/ATLAS.Magnet.Leaflet.pdf>>
- [4] Jeni, P.: *ATLAS Construction Status*, 2005, dostupné na WWW [cit. 8. 8. 2006]: <<http://www.scielo.br/pdf/bjp/v36n1b/a03v361b.pdf>>
- [5] Doležal, Z.: *Polovodičové detektory v jaderné a sub-jaderné fyzice*, dostupné na WWW [cit. 8. 8. 2006]: <<http://www-ucjf.troja.mff.cuni.cz/dolezal/teach/semicon/semi.p.pdf>>
- [6] Broklová, Z.: Diplomová práce *Vyhodnocení účinnosti a kvality polovodičových stripových detektorů pro detektor ATLAS (LHC CERN)*, Praha, 2003, dostupné na WWW [cit. 8. 8. 2006]: <[http://www-ucjf.troja.mff.cuni.cz/diploma\\_theses/broklova\\_dipl.pdf](http://www-ucjf.troja.mff.cuni.cz/diploma_theses/broklova_dipl.pdf)>
- [7] Řezníček, P.: Diplomová práce *Tests of semiconductor microstrip detectors of ATLAS detector*, Praha, 2003, dostupné na WWW [cit. 8. 8. 2006]: <[http://www-ucjf.troja.mff.cuni.cz/diploma\\_theses/reznicek\\_dipl.pdf](http://www-ucjf.troja.mff.cuni.cz/diploma_theses/reznicek_dipl.pdf)>
- [8] Kodyš, P., Doležal, Z., Escobar, C. aj.: *Laser tests of silicon detectors*, dostupné na WWW [cit. 8. 8. 2006]: <[http://www-ucjf.troja.mff.cuni.cz/kodys/works/laser\\_test/Tests2006](http://www-ucjf.troja.mff.cuni.cz/kodys/works/laser_test/Tests2006)>
- [9] Kodyš, P.: *Laser setup description*, dostupné na WWW [cit. 8. 8. 2006]: <[http://www-ucjf.troja.mff.cuni.cz/kodys/works/laser\\_test/LaserSetup2006/index.html](http://www-ucjf.troja.mff.cuni.cz/kodys/works/laser_test/LaserSetup2006/index.html)>
- [10] Douglas W. Jones: *Control of Stepping Motors*, dostupné na WWW [cit. 8. 8. 2006]: <<http://www.cs.uiowa.edu/%7Ejones/step/index.html>>
- [11] stránky výrobce [cit. 8. 8. 2006]: <<http://www.standa.lt>>