

UNIVERZITA KARLOVA  
MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ FAKULTA  
PRAHA



# TESTY KŘEMÍKOVÝCH DETEKTORŮ PRO ČÁSTICOVÉ EXPERIMENTY

**Peter Kodyš**

HABILITAČNÍ PRÁCE

LISTOPAD 2017

## Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>2</b>
<b>2 Částicové experimenty a křemíkové detektory</b>	<b>3</b>
<b>3 Testy detektorů určených pro experimenty částicové fyziky</b>	<b>4</b>
3.1 Stripový detektor SCT použitý v experimentu ATLAS	5
3.2 Stripový detektor ITk použitý v experimentu ATLAS Upgrade	6
3.3 Pixelový detektor DEPFET použitý v experimentu Belle II	8
3.4 Laboratoře křemíkových detektorů na ÚČJF MFF UK	10
3.5 Testy na svazku částic	11
3.6 Testy zářičem	12
3.7 Testy pomocí laseru	13
3.8 Výsledky testů křemíkových detektorů na ÚČJF MFF UK	15
<b>4 Systematické nepřesnosti v určování průletu částice detektorem</b>	<b>17</b>
4.1 Metody klasifikace, třídění a relevance korekcí	18
4.2 Určení odchylky a chyby polohy průletu částice	19
<b>5 Řešení korekcí v experimentu Belle II</b>	<b>20</b>
5.1 Simulace, digitizace a klasterizace odezvy detektorů	21
5.2 Korekce polohy a její chyby	21
5.2.1 Příprava dat	21
5.2.2 Výpočet korekcí	21
5.2.3 Aplikace korekcí	22
5.2.4 Validace výsledných korekcí	23
5.2.5 Ladění korekcí na reálných datech - testovací svazek	23
<b>Závěr</b>	<b>24</b>
<b>Literatura</b>	<b>24</b>
<b>6 Publikace související s předkládanou habilitační prací</b>	<b>27</b>
6.1 Testování křemíkových detektorů v pražské laboratoři	27
6.2 Testování modulů ATLAS SCT a jejich vyhodnocování na testovacích svazcích	28
6.3 Testování modulů DEPFET a jejich vyhodnocování na testovacích svazcích	29

# 1 Úvod

Jedním ze základních směrování lidského poznání je snaha pochopit, z čeho se náš svět skládá a jaké v něm platí zákonitosti. Po objevení existence částic tvořících atomy (1897, J. J. Thomson při studiu katodového záření objevil elektron) a později dalších částic se začaly formovat představy o vlastnostech světa částic, které v 70. letech 20. století vyústily do relativně ucelené teorie popisu elementárních částic známé jako **Standardní model částic a interakcí (SM)**. Úspěšnost modelu se ukázala hlavně v předpovědích: (i) existence a vlastností do té doby neznámých kvarků (c, b, t), (ii) bosonů W a Z včetně vlastností, (iii) Higgsova bosonu, (iiii) číselné předpovědi s chybou pod 0.1 %, (v) chladnutí a vývoje vesmíru, (vi) vysvětlení reliktního mikrovlnného záření.

Prověřování a doplňování SM vyžaduje zkoumání chování částic za specifických podmínek. Ty vytváříme srážkami částic při vysokých energiích a zkvalitňováním měření produktů srážek a následných rozpadů. Navíc zkoumané efekty se často vyskytují s velmi malou pravděpodobností, a proto je musíme selektovat z velkého počtu pokusů; vysoké energie srážek přitom často zvyšují pravděpodobnost výskytu jevu. Měření těchto jevů umožňují částicové experimenty.

Částicové experimenty na vysokých energiích často využívají kruhové urychlovače se svazky elektronů, pozitronů, protonů nebo těžších částic, jader atomů. Na urychlovačích se pak staví detektorové stanice v místě střetu svazků, umožňující detekci produktů srážek a rozpadů částic.

Křemíkové detektory se v částicové fyzice objevily v 60. letech 20. století. Požadavkem na stále větší počet vyhodnocovaných srážek a změření málo pravděpodobných rozpadů vznikl tlak na automatické vyhodnocování měření a efektivní nalézání vzácných rozpadů, zajímavých a důležitých pro vývoj poznání ve fyzice částic. Křemíkové detektory tyto požadavky splňovaly kompatibilitou s návaznou elektronikou na bázi křemíku (možnosti integrace vyhodnocovacích struktur přímo do senzoru) i přijatelnou cenou.

Základní funkcí detektorů je zabezpečení sesbírání náboje vytvořeného průletem částice a jeho odlišení od šumu. Navíc křemíkové detektory nabízely jednoduché vytváření segmentovaných detekčních buněk, vytváření pixelů nebo stripů různých tvarů, a tím umožňovaly přesnější prostorové určení místa průletu částice a rekonstrukci její dráhy, případně rekonstrukci společných počátků drah - vertexů.

Minimalizace rizika stavby nefunkčních drahých detektorových stanic vyžaduje důsledné proměřování a prověřování vlastností detektorů před jejich použitím. Prověřuje se jejich funkčnost po celou dobu života experimentu simulací všech faktorů poškozujících detektor, například záření nebo extrémní náboj sebraný detektorem. Základní testy prověřující vlastnosti detektorů jsou testy na svazcích, testy radioaktivním zářičem a testy laserem.

Moderní experimenty pracují s geometrickou přesností, kterou není možné zabezpečit precizní mechanickou montáží, proto byly vyvinuty postupy na zjištění a kompenzaci mechanických odchylek detektorů (včetně deformací senzorů vlivem gravitace nebo tepelnými skoky), tzv. alignmentovací algoritmy. Cílem doladování polohy je co nejpřesnější informace rekonstruované polohy průletu částice, kde se v současnosti dostáváme pod mikronovou hranici. Odhalování a korekce nepřesností pomáhá kvalitě detektoru a je nutné je sledovat a korigovat po celou dobu měření.

Cílem této práce je stručně shrnout základní metody testování křemíkových polovodičo-

vých detektorů používaných ve fyzice vysokých energií a ukázat jejich výsledky na příkladech detektorů z experimentu ATLAS na LHC a Belle II v KEK (to je obsahem kapitoly 3), pomocí testů ukázat na existenci systematických nepřesností v určení místa průletu částice a jeho chyby (kapitola 4) a ilustrovat řešení jejich korekcí v připravovaném detektoru Belle II v KEK. To je náplní kapitoly 5. Uvedená témata jsou podložena publikacemi přiloženými k této práci.

Publikace také dokládají autorovu vědeckou činnost v této oblasti. Autor se od roku 1998 podílí na návrhu a budování křemíkového detektoru ATLAS SCT stripových detektorů, od roku 2014 jeho modernizací na ATLAS ITk stripové detektory, a od roku 2005 participuje na vývoji pixelového detektoru DEPFET pro experiment Belle II. V rámci těchto programů autor řešil vývoj hybridů pro SCT a testování modulů testovacím svazkem v CERNu a DESY, zářičem a laserem ve Freiburgu (rok 2000, 2006, 2012) a podílel se na produkci modulů ve Valencii (rok 2004), dále pak budoval testovací laboratoř na pracovišti ÚČJF MFF UK v Praze. Autor je aktivní v kolaboraci RD50, která vyvíjí nové detektory odolávající zvlášť vysokým dávkám záření očekávaným u budoucích experimentů, podílel se na vývoji a testech minimatic nových detektorů DEPFET na pracovišti v Praze a zapojil se do testování nových polovodičových typů lavinových fotodiod. Angažuje se v organizaci využití výpočtové farmy grid pro experiment Belle II.

## 2 Částicové experimenty a křemíkové detektory

V práci jsou diskutovány detektorové systémy částicových experimentů ze dvou měřících stanic: ATLAS na urychlovači LHC ve výzkumném středisku CERN u Ženevy (podrobněji v částech 3.1 a 3.2) a nově budovaná detektorová stanice Belle II v centru KEK v Tsukubě u Tokia v Japonsku (podrobněji v části 3.3). Praha se podílela na vývoji stripových křemíkových detektorů (Semiconductor tracker, SCT) pro ATLAS, které v současnosti uspokojivě plní svou roli v centrálním detektoru. Dnes se pracuje na modernizaci těchto detektorů a uzpůsobení jejich vlastností na plánovanou vysokou luminozitu LHC (s názvem ITk - Inner Tracker pro ATLAS Upgrade) (podrobněji v části 3.2). Pro Belle II vyvíjíme a sestavujeme pixelový a stripový křemíkový detektor označovaný jako PXD (pixely) a SVD (stripy). Pixelový detektor PXD je postavený na technologii DEPFET s integrovaným prvním zesilovacím stupněm už na detekčním pixelu a na jeho vývoji se také aktivně podílí skupina Praze.

Nároky kladené na detektorovou stanici vycházejí ze studií zkoumajících potřeby experimentu a možnosti detektorů. Na základě stávajících poznatků a odhadů technického a technologického vývoje se určují možnosti a hranice navrhovaného měření a prokazuje se jeho proveditelnost. Hlavní části stanice můžeme rozdělit na prostor srážky částic (IP - Interaction Point), vnitřní detektor měřící tvary drah nabitých částic, magnet zabezpečující magnetické pole potřebné k zakřivení drah nabitých částic, kalorimetr k změření jejich energie a rozlišení různých druhů částic, mionové komory a nakonec triggerový systém poskytující časovou informaci, kdy proběhla srážka.

Důležitou částí detektorové stanice je vnitřní dráhový detektor. V ideálním případě měří celé spektrum zakřivení drah částic bez toho, aby je ovlivnil, a propustí je do kalorimetrů. Ty určí energii částic a přitom dojde k jejich absorpci. V reálném světě na změření dráhy částice potřebujeme detektory, které mnohonásobným rozptylem na své hmotě ovlivňují

dráhy částic, čímž určují limity možné přesnosti určení polohy a umožňují snížit granularitu detektorů a nastavit rozumné požadavky i z hlediska množství ukládaných dat. Data z dráhového detektoru mohou tvořit až 95% celého ukládaného objemu dat. Takto laděný kompromis musí zohlednit další podmínky vycházející z požadavků měřených fyzikálních procesů a odhadu nezměřených nebo neznámých oblastí částicové fyziky.

Vyhovující cenově dostupný materiál používaný pro detektory (nízké atomové číslo způsobuje menší rozptyl částic) je křemík. Základní požadavky částicových experimentů na detektory na bázi křemíku jsou:

1. malá hmotnost a tloušťka (z poměrně standardních  $300\ \mu\text{m}$  se tloušťka snížila na  $75\ \mu\text{m}$  a méně)
2. vysoká dosažitelná granularita a přesnost určení polohy průsečíku
3. dostatečná radiační odolnost
4. dostatečná rychlost odezvy k dosažení co nejvyšší hustoty srážek a jejich odlišení

Detektorová stanice bude tedy složená z detektorů na bázi křemíku. Jednotlivé detektory využívají jako samotný senzor průletu částice křemík, dále obsahují elektroniku na vyčtení informace ze senzoru a komunikační část. Ta zabezpečuje konfigurace detektorů a jejich kalibrování, komprimaci sebrané informace ze senzoru a její odesílání do centrálního úložiště. Takto vytvořený detektor budeme dál označovat jako modul, je to relativně samostatná jednotka schopná samostatného proměřování a testování.

V dalších částech této práce se budeme zabývat hlavně moduly a pokusíme se ukázat metody jejich testování a výsledky na ATLAS SCT a ITk modulech a na Belle II DEPFET PXD modulech.

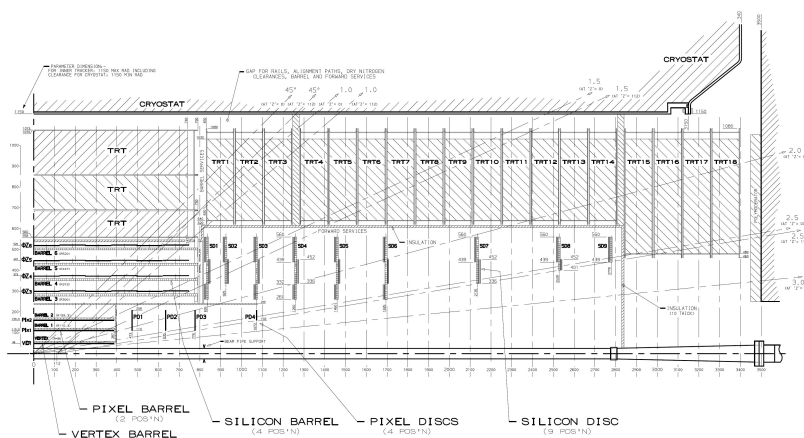
### 3 Testy detektorů určených pro experimenty částicové fyziky

Křemíkové detektory určené pro dráhové detektory v částicových experimentech jsou charakterizované následujícími vlastnostmi:

- účinnost sběru náboje - jaká část z deponovaného náboje v senzoru se sesbírá, detekuje
- přesnost určení průsečíku dráhy částice a roviny senzoru
- rozložení náboje v čase, tvar detekovaného pulzu v čase, strmost náběžné hrany
- velikost klastru, do kolika detekčních jednotek (pixelů, stripů) se náboj rozloží
- poměr signálu k šumu na spolehlivé zachycení průletu částice

Návrh detektorů musí řešit jejich radiační odolnost, tloušťku senzorů, velikost pixelů nebo omezení na použité materiály. Další vlivy, které se musí zohlednit: přítomnost silného magnetického pole, navazující elektronika a čipy, vyprazdňovací napětí (bias, depletion voltage), směry průletu částic vůči rovině senzoru.

Nabitá částice prolétající křemíkem tloušťky  $300\ \mu\text{m}$  v něm zanechá energii v průměru  $116\ \text{keV}$ . Tato energie postačuje na vytvoření  $32\ 000$  elektron-děrových párů s celkovým



Obr. 1: Dráhový detektor ATLAS SCT: náčrtek uspořádání [1].

nábojem 5,12 fC. Zkvalitňováním vyčítací elektroniky (třeba její integrací do pixelu, jak bylo použito u detektorů DEPFET) nám stačí menší náboj a můžeme detektory ztenčovat. Tím se zmenší jejich vliv na prolétající částici a máme tak lepší detektor. Paralelně s tím se musí řešit mechanické uchycení, chlazení, sběr informací z velkého množství detekčních elementů, oddělení/filtrování šumové informace a efektivní redukce objemu získaných dat.

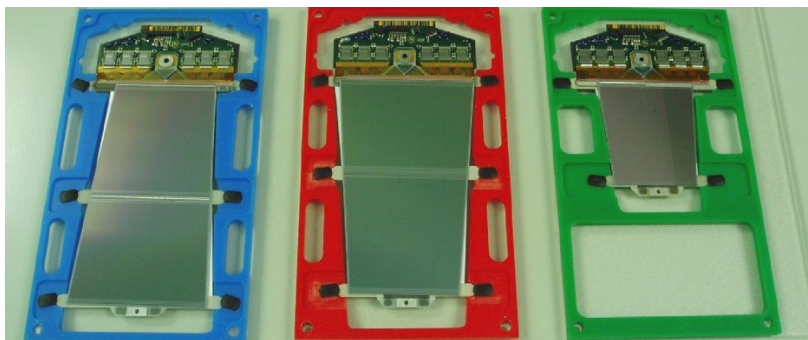
Všechna témata prezentovaná v této kapitole autor řešil, anebo vedl studenty k jejich řešení.

### 3.1 Stripový detektor SCT použitý v experimentu ATLAS

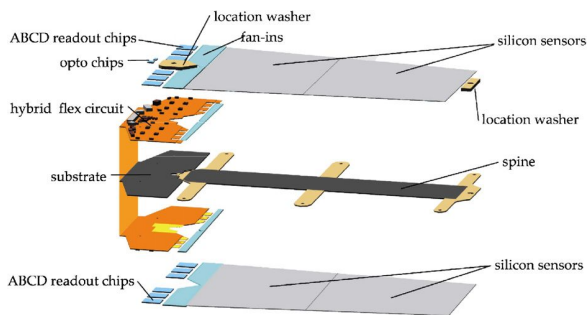
Experiment ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus) se nachází v mezinárodní laboratoři CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) u Ženevy. Je postavený na urychlovači LHC (Large Hadron Collider) produkujícím od roku 2013 srážky protonů v těžiškové energii 7 TeV, od roku 2015 na energii 13 TeV a luminozitou  $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Několik měsíců v roce urychlovač urychluje a poskytuje srážky těžkých iontů. Centrální část detektoru ATLAS se skládá z několika vrstev pixelových a stripových (SCT) detektorů a z detektorů přechodového záření (TRT Transition Radiation Tracker). Zabezpečuje měření drah nabitých částic nutných pro rekonstrukci fyzikálních dějů.

Stripové detektory tvoří 4 válce v centrální části (Barrels) a 9 disků po obou stranách válců (End Caps, EC), zobrazené na schématu na obrázku 1. Dohromady bylo použito 4088 modulů, každý z nich je pokrytý  $2 \times 768$  detekčními proužky (stripy). 200 modulů bylo zkompletováno a otestováno na pracovišti ÚČJF MFF UK, které se podílelo na jejich vývoji a testech vlastností a kvality modulů, bylo koordinátorem zajištění kvality výroby a kvality výstupních testů.

Modul EC SCT byl vyráběn ve 4 modifikacích, vyobrazených na obrázku 2, z důvodu pokrytí celé plochy disků. Verze vyráběná a testovaná v Praze byla tvořena 4 křemíkovými senzory lichoběžníkového tvaru, každý o ploše cca  $6 \times 6 \text{ cm}^2$  a tloušťce  $285 \mu\text{m}$ , s rozbíhavými stripy propojenými tak, že měly efektivní délku 12 cm a průměrnou vzdálenost od sebe  $80 \mu\text{m}$ . Každý modul má vyčítací elektroniku na hybridu umístěném na jedné straně senzoru. Na hybridu se nachází  $6 + 6$  čipů s předzesilovací elektronikou napojených na stripy senzoru, složení modulu je zobrazené na obrázku 3. Protilehlé strany senzorů byly vůči sobě



Obr. 2: ATLAS: základní tvary SCT detektorů [2].



Obr. 3: ATLAS SCT konstrukce [2].

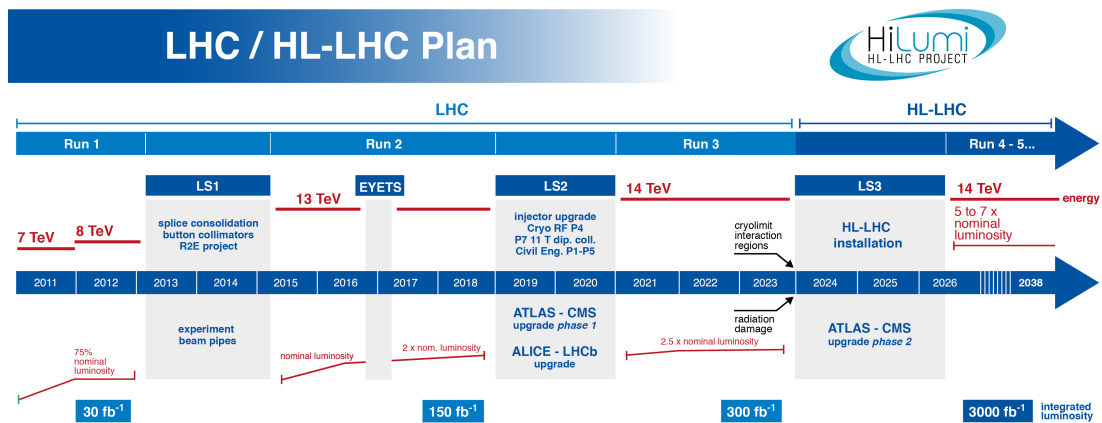
natočené v úhlu 40 mrad, čímž byla dosažena rozlišovací schopnost v tangenciálním směru  $R\phi \approx 16 \mu\text{m}$  a v radiálním směru  $R \approx 580 \mu\text{m}$ . Více v [2] přiložené k práci. Pražská skupina vkládala geometrii modulu do prostředí Athena na simulace detektoru ATLAS [3] (přiložená k práci).

### 3.2 Stripový detektor ITk použitý v experimentu ATLAS Upgrade

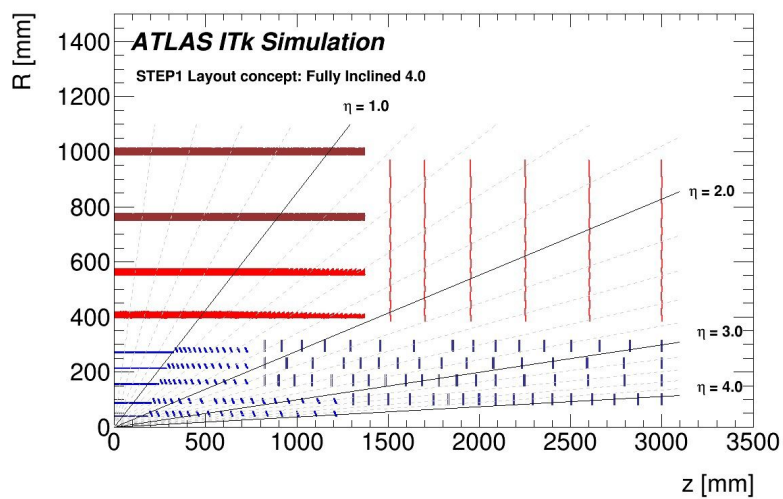
ATLAS Upgrade je další fází života experimentu ATLAS a představuje výrazné obměny některých částí samotného detektoru i urychlovače. Urychlovač bude přestavěn na tzv. HL-LHC (High Luminosity LHC) na produkci částic vyšších energií - plán je dosáhnout 14TeV energií a luminozita se má zvýšit 5 - 7 krát na  $7,5 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  od roku 2025 oproti současné nominální luminozitě, detailnější plán je na obrázku 4. Změnou musí projít i vnitřní dráhový detektor, kde už nebudou TRT detektory, ale bude celokřemíkový s vrstvami pixelových a stripových detektorů ITk (Inner Tracker), schéma uspořádání je zobrazeno na obrázku 5. Vývoj a výroba ITk je jeden ze závazků české kolaborace ATLAS.

Pracovní skupinou v CERN řešící zvýšení odolnosti detektorů na záření je kolaborace RD50, jíž jsme také členy.

V ATLAS Upgrade je navržena nová geometrie stripových modulů. Senzor bude křemík typu n, lépe radiačně odolný. Centrální barel detektor bude mít 4 vrstvy, koncové disky budou tvořené 7 vrstvami na obou koncích. Stripy nebudou dlouhé 12 cm, ale budou mít 2,38 - 4,78 cm, a proto nebude potřeba dvou vrstev na dostatečnou radiální granulaci. Moduly se nebudou instalovat dohromady po jednotlivých senzorech, ale spojí se do pásu

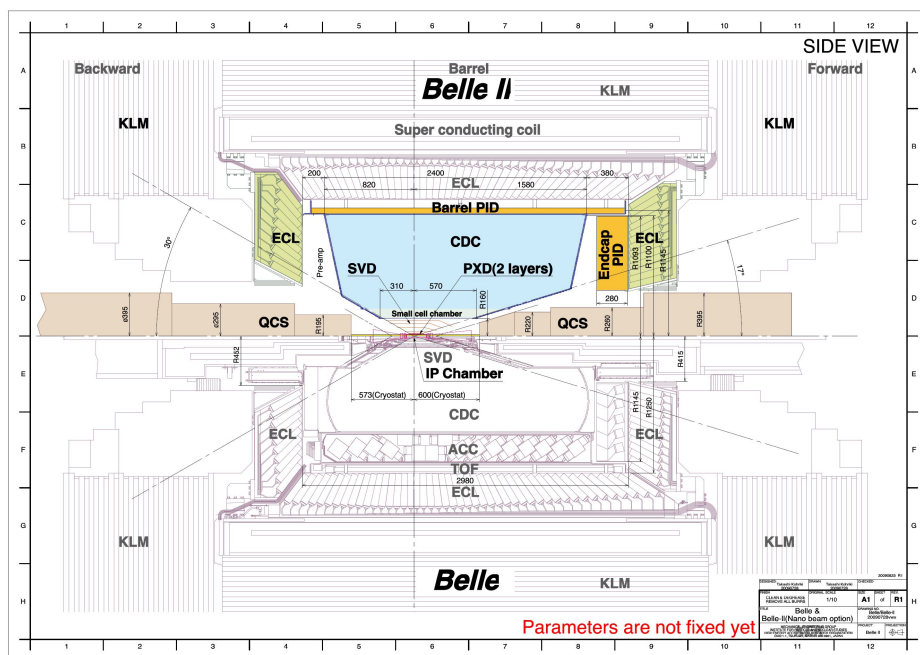


Obr. 4: LHC/ HL-LHC plán (aktualizace k červenci 2017) [4].



Obr. 5: Plán uspořádání křemíkových detektorů pro ATLAS Upgrade [5].





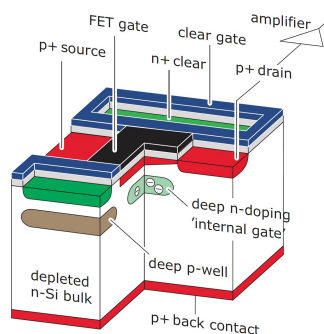
**Obr. 6:** Upgrade Belle (dolní polovina nákresu) na Belle II doplněný o 2 vrstvy pixelových detektorů typu DEPFET (horní polovina nákresu) [6].

detektorů a ten se zasune na svou finální pozici jako celek. Vychítavací čipy budou na hybridech ve větším počtu a budou energeticky úspornější.

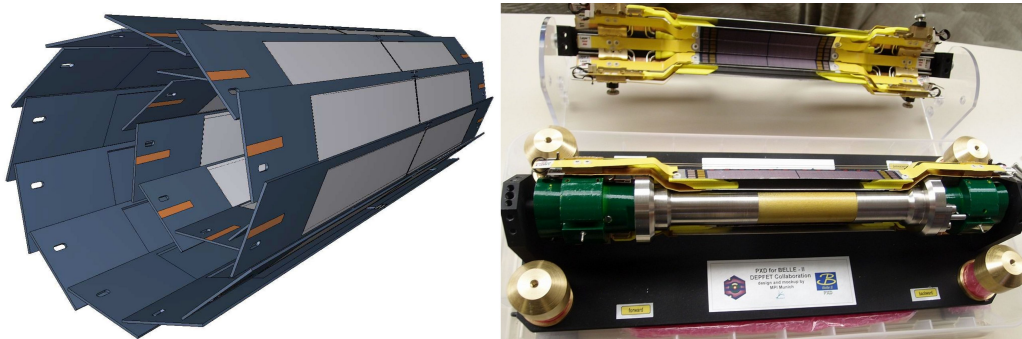
### 3.3 Pixelový detektor DEPFET použitý v experimentu Belle II

Belle II experiment se nachází v KEK a je pokračováním experimentu Belle s dosaženou luminozitou  $2,11 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ , ukončeného v roce 2010. Spuštění Belle II experimentu je plánované na konec roku 2018. Experiment využívá vstříčné svazky elektronů (7 GeV) a pozitronů (4 GeV) koncentrované v místě srážky do velmi malého objemu  $10 \mu\text{m} \times 50 \text{ nm} \times 6 \text{ mm}$ , zvaného též nano-beam. V tomto uspořádání je plánovaná  $40 \times$  vyšší špičková luminozita  $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Dalším významným zlepšením je rozlišení vnitřního detektoru z rozlišení několik desítek mikronů v Belle na zhruba dvakrát lepší rozlišení v Belle II dosažené přidáním 2 vrstev pixelových detektorů typu DEPFET. Rozdíl mezi původním Belle a modernizovaným Belle II je zobrazený na schématu na obrázku 6.

DEPFET (DEPLETED Field Effect Transistor technology) je křemíkový detektor dostatečně radiačně odolný pro potřeby Belle II. Detektor má tloušťku  $75 \mu\text{m}$  a pixely o rozměrech  $50 \mu\text{m} \times 55/60/70/85 \mu\text{m}$ , s tlustší výstužnou strukturou po obvodě, pracující při pokojové teplotě a bez nutnosti speciálního chlazení. Detektor obsahuje křemíkový senzor typu n vyprázdňovaný přiloženým napětím, a proto schopný integrovat náboj z celé dráhy částice v senzoru. V blízkosti povrchu je technologií hloubkového implantu vytvořen kontakt (internal gate) typu n, který sbírá náboj (elektrony) vytvořený v senzoru; struktura je zobrazená na obrázku 7. Další povrchové elektrody kolem internal gate vytváří strukturu FET tranzistoru, náboj na internal gate - hradlo FET tranzistoru - modifikuje kolektorový proud a zabezpečuje významné zesílení signálu. Následuje vyčtení sesbíraného náboje, jeho



Obr. 7: Schéma struktury detektoru DEPFET [6].



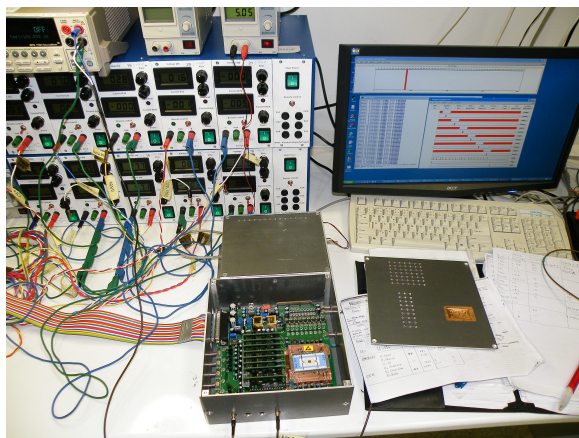
Obr. 8: Rozložení detektorů DEPFET kolem interakčního bodu v PXD experimentu Belle II [6] a model.

odstranění a příprava detektoru na další cyklus. Vyčtení se realizuje postupným otevíráním řádků a jejich paralelním vyčtením. Vyčítací struktura je celá integrována na povrchu a vyznačuje se malým šumem a vysokým poměrem signál/šum, očekává se vyšší než 20. Dále je na povrchu integrována struktura vodičů zabezpečující řízení pixelu a vyčtení získaného signálu. DEPFET je citlivý na částice, fotony i RTG záření.

Belle II PXD má 1536 vyčítaných řádků, 7,68 milionů pixelů na 40 samostatných senzorech tvořících 2 vrstvy kolem interakčního bodu svazků (obrázek 8), doba jednoho cyklu vyčtení je 20  $\mu\text{s}$ . Stripové detektory tvoří další 4 vrstvy a vytvářejí predikce průsečíků drah do PXD určené k uložení.

Dosažená přesnost určení polohy průsečíku potvrzená na testovacích svazcích je v rozmezí 7 až 12  $\mu\text{m}$  v závislosti na souřadnici, směru dráhy částice a tvaru klastru. Vzorčky testované v laboratořích ÚČJF MFF UK a na testovacích svazcích dosáhly v některých případech přesnost pod 1  $\mu\text{m}$  (tloušťka 450  $\mu\text{m}$ , rozměry pixelu  $18 \times 18 \mu\text{m}^2$ ). Systematické odchylky průsečíků a reálnější nastavení odhadu chyby průsečíků popisují další části této práce.

Zajímavou a unikátní funkcí, specifickou pro částicový experiment na kruhovém urychlovači v KEK, je možnost uzavření před nábojem vytvářeným v objemu senzoru (gated mode). Byla vyřešena specificky pro DEPFET detektory. Na prostor kolem internal gate se aplikuje elektrické pole stínící gate, přicházející náboj je odveden pryč a stávající náboj na hradle (gate) zůstává zakonzervovaný. Po uvolnění sběr probíhá dál a informace vložená na hradle před a po gated mode zůstává zachována k vyčtení. Tato funkce chrání detektor před zahlcením šumem v průběhu plnění urychlovače částicemi po dobu asi 1  $\mu\text{s}$ . První měření



**Obr. 9:** Testování minimatice DEPFET.



**Obr. 10:** Laboratoř vysoké čistoty na ÚČJF MFF UK.

této funkce bylo realizováno v naší laboratoři na ÚČJF MFF UK na vzorcích DEPFET - minimaticích (Obr. 9).

### 3.4 Laboratoře křemíkových detektorů na ÚČJF MFF UK

Laboratoř křemíkových detektorů pro částicové experimenty na ÚČJF MFF UK umožňuje provádět testy křemíkových detektorů použitím zářiče a laserovým svazkem [7] (přiložená k práci). Laboratoř se v současnosti skládá ze tří prostorů: místnost vysoké čistoty (Clean Room 1, CR1, 2001, třída čistoty 100 000, lokálně až 10 000, na fotografii na obrázku 10) na testování hlavně laserem, místnost izolovaná klimatizací (Clean Room 2, CR2, 2010) na méně náročné testy a místnost na přípravu elektroniky (Electronic Room, ER, 2010), více v [8]. Laboratoře navázaly na existující laboratoř Van de Graaffova urychlovače kvůli potřebě testování 200 modulů pro ATLAS SCT. Všechny laboratoře obsahují testovací elektrické vybavení, světelně a tepelně izolovaný prostor (black box) vhodný na testování, CR1 a CR2 mají speciální laminární boxy vytvářející prostor vyšší čistoty.

Základní testy prováděné v laboratořích jsou testy lasery o vlnové délce 660 nm, 1060 nm,



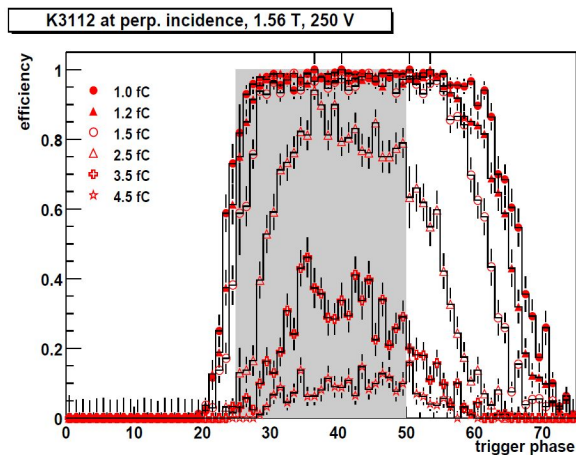
**Obr. 11:** Práce na testovacím svazku v CERNu, student ÚČJF Kepka zapojuje chlazení a elektroniku.

do 1 mW výkonu a 658 nm do 50 mW výkonu s modulovatelným tvarem pulzu, fokusovatelné do bodu velikosti  $\text{RMS} \approx 3 \mu\text{m}$ . Je možné dálkově kontrolovat a měnit místo zaostření laseru, jeho směr a teplotu prostředí do  $-20^\circ\text{C}$  se stabilizací teploty v rozmezí  $0, 3^\circ\text{C}$ . Optický modulátor útlumu umožňuje snižovat energii pulsu až na úroveň jednotek fotonů v pulzu. Testy zářičem je možné provádět na zářičích  $\alpha$ ,  $\beta$  a  $\gamma$ . Laboratoře jsou schopné automatizace měření bez zásahu a přítomnosti obsluhy s možností vzdáleného přístupu. V CR1 se nachází mikroskop s možností fotografování pozorovaného objektu a manuální testovací stanice (Probe Station). V CR2 jsou umístěné bondovací poloautomatická stanice a laserová skenovací bezkontaktní stanice nerovností povrchu s přesností na úrovni mikronu.

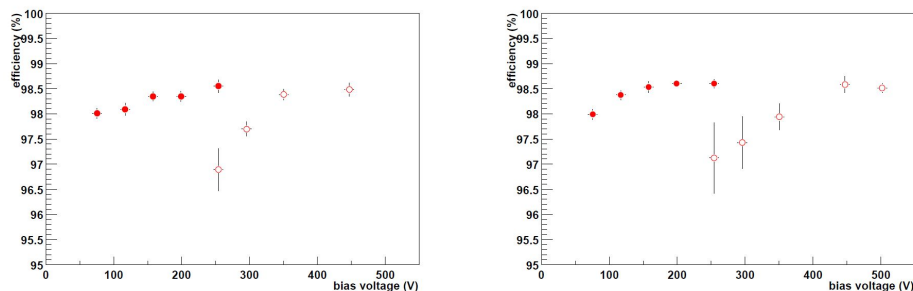
### 3.5 Testy na svazku částic

Testování na svazcích probíhá v CERNu na protonovém, respektive pionovém svazku na energiích 150 - 180 GeV a v magnetických polích 1,56 T (Obr. 11) a v DESY na svazku elektronů nebo pozitronů s energiemi 2,0 - 6,0 GeV. Testování na svazku má nejblíže k podmínkám reálného experimentu. Je tudíž velmi hodnotné a vyžaduje se před povolením instalovat detektor. Prověří schopnost detektoru zaměřit průlet částice v požadované přesnosti, vyladění časování, požadovanou účinnost a šum detektoru. Detektor se umísťuje mezi jiné prověřené detektory (teleskopy), které zaměří částici a určí místo průletu. Srovnávání předpovědi průletu se zaznamenanou informací umožňuje proměření detektoru. Natáčení roviny detektoru a jeho umístění do magnetického pole je součástí standardního testování. Další důležité podmínky pro testování jsou teplota a proměření vlastností detektorů na konci jejich životnosti, kdy budou poškozené zářením experimentu. K tomu se organizují ozařování různými druhy částic (protony, neutrony, fotony) na očekávané dávky.

Asi jedinou nevýhodou testování na svazcích je vysoká cena a nutnost spolupráce velkého



**Obr. 12:** Ozářený modul SCT - časová charakteristika účinnosti změřená na testovacím svazku, více informací v [9] (přiložená k práci).



**Obr. 13:** Neozářený (plná kolečka) a ozářený (prázdná kolečka) modul SCT - účinnost detektorů v závislosti na vyprazdňovacím napětí změřená na testovacím svazku pro práh 1 fC a magnetické pole 0 T (vlevo) a 1,56 T (vpravo). Více informací v [9] (přiložená k práci).

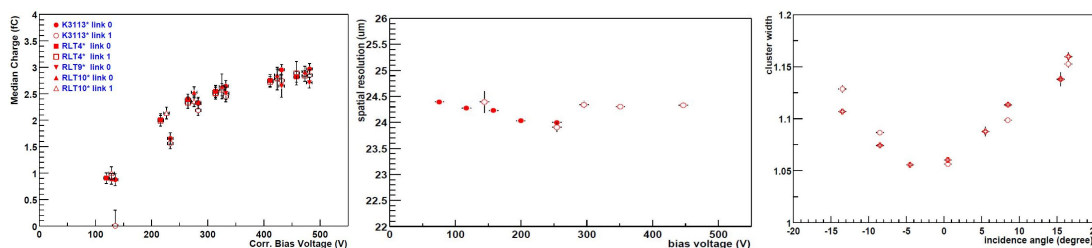
počtu lidí. Alternativní metody testování zářičem a laserem jsou výrazně levnější a umožňují z velké míry nahradit svazek urychlovače a připravit detektor tak, aby testy svazkem měřily hlavně vlastnosti detektorů a nesloužily k jeho ladění. Proto je vývoj laboratorních testů vítaný.

Významným úkolem je vyhodnocení dat a eliminace efektů, které nebudou mít na vlastnosti detektoru vliv v experimentu.

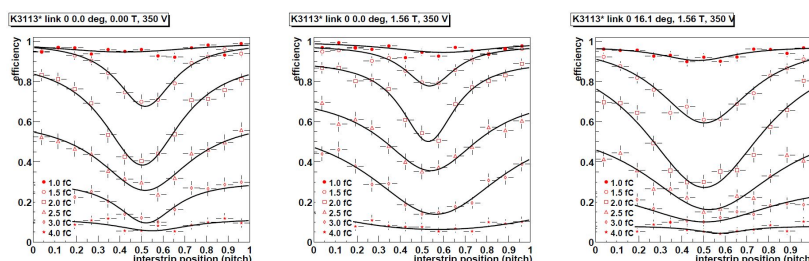
Příklady výsledků testů na testovacích svazcích pro detektory SCT v CERNu jsou na grafech 12, 13, 14 a 15, které ukazují některé důležité charakteristiky. Souhrn nejdůležitějších měřených testů, zjištění z nich a důsledků testů je v kapitole 3.8.

### 3.6 Testy zářičem

Testování zářičem (Obr. 16) umožňuje testování reálnými částicemi za podobných podmínek jako testování svazky částic popsané v části 3.5. Hlavní rozdíly jsou v energiích částic, které jsou výrazně nižší (desítky keV - MeV) a neumožňují instalaci teleskopového systému, a proto neznáme polohu průletu částice. Typické zdroje záření, které se k testování využívají, jsou  $\beta$  zářiče  $^{90}\text{Sr} \rightarrow ^{90}\text{Y}$  s energií elektronu 2,3 MeV nebo  $^{106}\text{Ru} \rightarrow ^{106}\text{Rh}$  s energií elek-



**Obř. 14:** Ozářený modul SCT - velikost sebraného náboje detektorů kolmého svazku (vlevo) a rozlišovací schopnost (uprostřed) v závislosti na vyprazdňovacím napětí, a úhlová závislost velikosti klastrů (vpravo), změřeno na testovacím svazku pro magnetické pole 1,56 T, více informací v [9] (přiložená k práci).



**Obř. 15:** Ozářený modul SCT - mezistripová účinnost detektorů změřená na testovacím svazku pro různé prahy bez magnetického pole (vlevo), s polem kolmý svazek (uprostřed) a pod uhem 16° (vpravo), více informací v [9] (přiložená k práci).

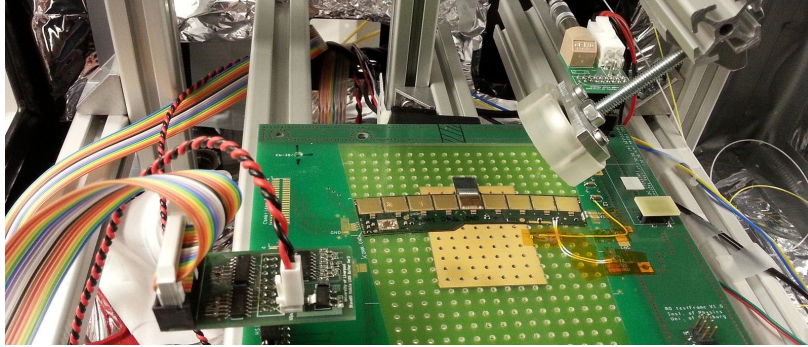
tronu 2,5 MeV. Nízká energie částic také mění velikost deponovaného náboje při průletu částice. Velikost náboje závisí na energii částice, což komplikuje interpretaci. Také to komplikuje použití triggerovacího systému, což je obvykle scintilátor, určujícího čas průletu částice a spouštějícího vyčtení testovaného detektoru.

Příklady výsledků testů  $\beta$  - zářičem pro detektory ITk jsou na grafech 17 a 18, ukazujících některé důležité výsledky. Souhrn nejdůležitějších měřených testů, zjištění z nich a důsledků testů je v kapitole 3.8.

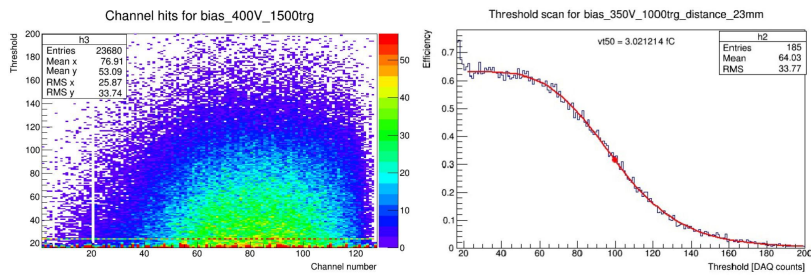
### 3.7 Testy pomocí laseru

Testování laserem je specifické oproti výše zmíněným testům. Detektor není testovaný nabitými částicemi, ale svazkem fotonů. Tvorba náboje v křemíku je principiálně jiná: foton s dostatečnou energií může způsobit vznik elektron-děrového páru, v elektrickém poli dojde k jeho roztržení, elektron a vzniklá díra pak v elektrickém poli putují k elektrodám - stripům. Náboj se netvoří po dráze částice, ale směrem od vstupního povrchu jeho tvorba exponenciálně klesá. Pro částicové experimenty vyžadujeme tvorbu náboje kolem 5fC za velmi krátký čas, deponovanou energii v tomto rozsahu lze naladit použitím optických atenuátorů snižujících energii laserového pulzu.

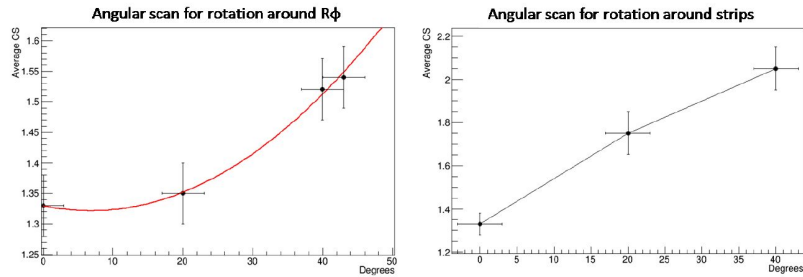
Dalším důležitým aspektem laserových testů jsou optické vlastnosti testovaných vzorků. Je potřeba zohlednit tloušťky různých ochranných vrstev i samotnou transparentnost křemíku, která se výrazně mění podle vlnové délky světla. Pro vlnovou délku světla 650 nm je propustnost křemíku jednotky mikronů, pro 1 050 nm až 4 mm, kde světlo prochází celou tloušťkou detektoru a na zadní straně se může odrazet zpět. Fakt, že z výroby senzorů není



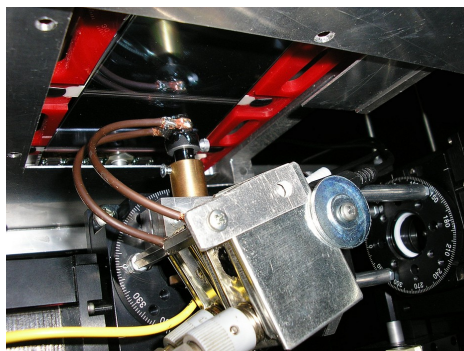
**Obr. 16:** Testování vzorku ITk senzoru zářičem pod úhlem  $45^\circ$  v pražské laboratoři.



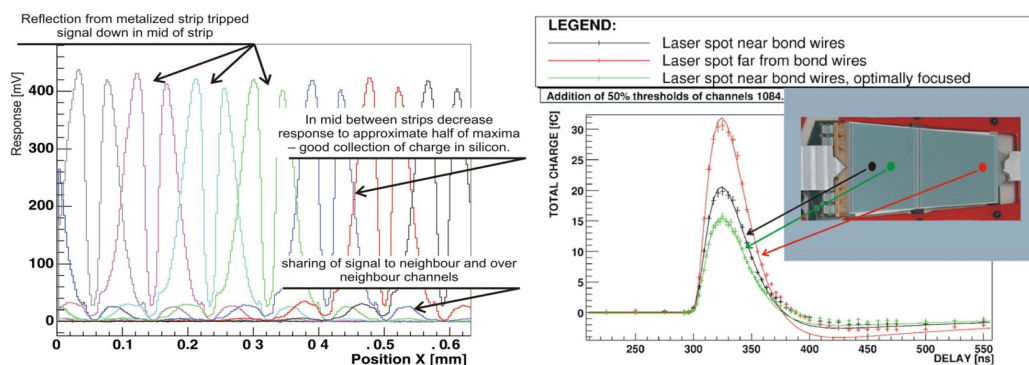
**Obr. 17:** Modul ITk - nabraná data (vlevo) a jejich vyhodnocení určením deponovaného náboje (vpravo) na  $\beta$ -testech, více informací v [10].



**Obr. 18:** Modul ITk - úhlový sken průměrné velikosti klastrů ve směru napříč stripy (vlevo), a po směru stripů (vpravo) na  $\beta$ -testech, více informací v [10].



**Obr. 19:** Testování SCT modulu laserem s optickou hlavičkou monitorující intenzitu pulzu v pražské laboratoři.



**Obr. 20:** Modul SCT - typická odezva signálu při měření laserem napříč stripy (vlevo) a měření časové odezvy signálu v různých místech detektoru (vpravo), více informací v [12] přiložené k práci.

zaručena tloušťka jednotlivých vrstev, může způsobovat různé interferenční jevy ovlivňující testy. Měření absolutní velikosti náboje deponovaného laserem je proto komplikované, i když po příslušných kalibracích nikoli nemožné (Obr. 19), jak je ukázané v práci [11] - přiložená k práci.

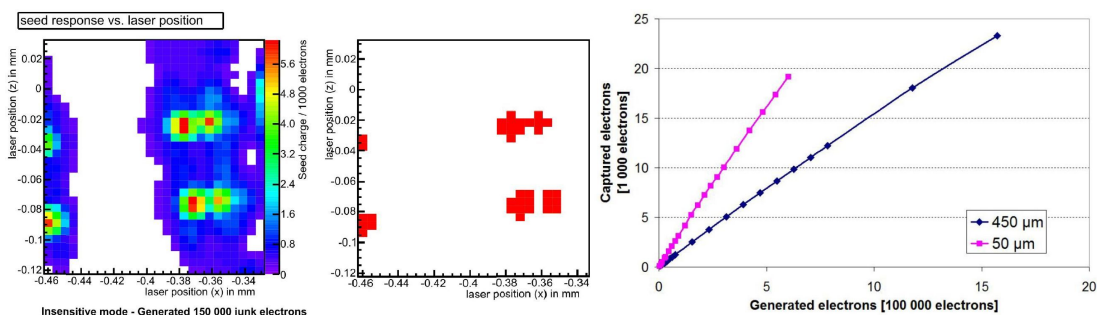
Laserové testy mají některé unikátní vlastnosti: přesné načasování doby pulzu, možnosti definovaných dvojitých pulzů, přesné polohování a nasměrování svazku fotonů. Umožňují proměření účinnosti sběru náboje po ploše detekčního elementu a v čase. Pro tyto vlastnosti je měření laserem zajímavé a užitečně doplňuje testy zářičem. Příklady výsledků testů laserem pro detektory DEPFET a SCT jsou na grafech 20 a 21, ukazujících některé důležité výsledky. Souhrn nejdůležitějších měřených testů, zjištění z nich a důsledků testů je v kapitole 3.8. Shrnutí zkušeností z ÚČJF MFF UK je v [12] přiložené k práci.

### 3.8 Výsledky testů křemíkových detektorů na ÚČJF MFF UK

Na testovacích svazcích a v laboratoři na ÚČJF MFF UK byly autorem nebo pod jeho vedením měřeny detektory SCT, ITk a DEPFET. Zjistily se tyto podstatné závěry:

- SCT moduly byly pravidelně testovány na testovacích svazcích v CERNu včetně ozářených detektorů při teplotách pod  $-20^{\circ}\text{C}$ . Skupina laboratoře ÚČJF MFF UK





**Obr. 21:** Minimatices DEPFET - sebraný náboj v režimu gated mode ukazuje malou frakci proniknutého náboje (vlevo) a vyhodnocení izolační schopnosti pro dvě tloušťky senzoru (vpravo), měřeno laserem, více informací v [13] přiložené k práci.

byla jednou ze dvou skupin provádějících kompletní analýzu dat a jejich interpretaci [14] (přiložená k práci), [9], [15], [16].

- U SCT modulu byla prověřena vyhovující odezva senzorů z firem CiS a Hamamatsu, které byly vzájemně porovnány. Prokázalo se, že nedochází ke ztrátám náboje v mezistripových oblastech a v oblastech zvýšeného šumu u CiS detektorů nedochází ke ztrátám náboje.
- U SCT modulu byl potvrzen správný sběr náboje v laboratorních podmínkách pomocí  $\beta$  zářiče na obou stranách modulu pro Hamamatsu i CiS senzory.
- ITk moduly se vzory senzorů vyvíjené pro ATLAS Upgrade jsou v současnosti testované v laboratoři (Obr. 16). Laboratoř se podílí na vývoji algoritmů pro testování laserem a zářičem v testovacím software SCTDAQ, později ITKDAQ. Je jedním z hlavních řešitelů pro vyhodnocování dat z laser testů a testů zářičem.
- DEPFET senzory byly pravidelně testovány na svazcích v CERNu a v DESY, kde byly prováděny analýzy vlastností senzorů. Skupina na ÚČJF MFF UK určovala standardy analýzy a jako první ukázala překonání hranice 1 mikron v přesnosti určení průletu částic detektory [17] - přiložená k práci.
- DEPFET minimatices byly testovány v laboratoři. Tvořily zkušební vzorky pro výsledný návrh pro experiment Belle II. Jejich testováním se optimalizovaly pracovní body senzoru. V laboratoři na ÚČJF MFF UK byl poprvé změřen a optimalizován režim pro tzv. gated mode - odstínění vnitřní brány od příchozího náboje a zachování stávajícího ([13] přiložená k práci).
- DEPFET detektor byl připravován jako kandidát pro další experiment ILC (International Linear Colider) [18] přiložená k práci.

Testy v laboratoři na ÚČJF MFF UK a výsledky analýz z testovacích svazků v CERNu ukázaly vyhovující vlastnosti CiS senzorů, které byly pak schváleny k použití do experimentu ATLAS [19], [20]. Bylo charakterizováno více než 200 finálních modulů s tím, že laboratoř navíc řešila speciální problémové moduly, které vykazovaly odchylky od očekávání.

U detektorů ITk byly změřeny charakteristiky vstupních obvodů (FE elektronika), byly identifikovány závažné problémy v interpretacích některých parametrů a byly odhaleny chyby ve firmware testovací elektroniky.

Na základě testů minimatic DEPFET senzorů byl prokázán jako řešitelný koncept gated módu, a tím vhodnost pixelových detektorů pro experiment BELLE II. Podobně výsledky testů na svazcích ukázaly systematické chyby při určování rekonstruované polohy průletu, což vyústilo do vytvoření mechanismu korekcí eliminujících tyto efekty. Korekce byly rozpracovány například v [21] přiložené k práci. Podrobněji se těmto efektům věnuje kapitola 4.

## 4 Systematické nepřesnosti v určování průletu částice detektorem

Úlohou vnitřního dráhového detektoru je určit začátek a konec dráhy nabitě částice a pomocí zakřivení její dráhy v magnetickém poli určit její hybnost. K tomu nám slouží vztah (1) pro příčnou hybnost  $p_T$ :

$$p_T = qB\rho \quad (1)$$

kde  $p_T$  je příčná hybnost,  $q$  náboj částice,  $B$  magnetické pole a  $\rho$  je poloměr zakřivení dráhy.

Pro  $N$  bodů zatížených stejnou chybou platí vztah (2), podrobněji je řešení diskutováno například v diplomové práci [22]:

$$\frac{\sigma(p_T)}{p_T} = \frac{p_T}{0.3BL^2} \sqrt{\frac{720(N-1)^3}{N(N-2)(N+1)(N+2)}} \sigma(x) \quad (2)$$

kde  $\sigma(p_T)$  je chyba určení  $p_T$ ,  $L = 2\rho \sin(\alpha/2)$ ,  $\alpha$  je vrcholový úhel oblouku dráhy,  $N$  je počet měřených bodů,  $\sigma(x)$  chyba určení bodu (stejná pro všechny body pro tento příklad).

Je evidentně výhodné mít více měřených bodů, nevýhoda je více materiálu v prostoru a větší rozptyl částice, jak je ukázáno v práci [23]. Dobré určení polohy průsečíku a správný odhad chyby polohy jsou proto důležité pro nejlepší možné určení dráhy a následně  $p_T$ .

Základní metody využívané pro určování polohy průsečíku dráhy nabitě částice s rovinnou detektorem jsou metody určení těžiště (metoda Centre of Gravity, COG, rovnice (3)), v kombinaci s Head-Tail metodami, rovnice (4), pro větší klastry.

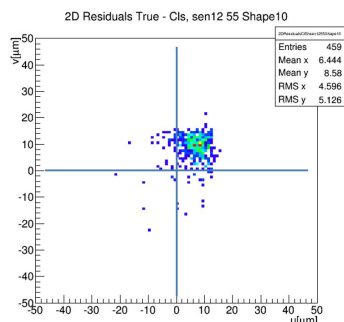
Metoda COG určuje polohu průletu rovnicí:

$$X_{COG} = \frac{\sum_{Cluster} (S_i \cdot x_i)}{\sum_{Cluster} (S_i)} \quad (3)$$

kde  $x_i$  je poloha  $i$ -tého pixelu v klastru,  $S_i$  je signál pixelu a  $X_{COG}$  je rekonstruovaná poloha průsečíku dráhy nabitě částice v jednom směru, analogicky bude vypočítána poloha pro druhou souřadnici.

Head-Tail metoda využívá pro zpřesnění polohy průletu částice pixely na okrajích klastru vůči zprůměrované hodnotě signálu vnitřních pixelů rovnicí (4):

$$X_{HT} = \frac{x_{Head} - x_{Tail}}{2} + \frac{S_{Tail} - S_{Head}}{2S_{Avg}} p \quad (4)$$



**Obr. 22:** Ukázka systematického posunu rekonstruovaných poloh průletu částice od skutečných v rovině detektoru pro klastry tvaru "L".

kde podobně jako u rovnice (3)  $x$  je poloha a  $S$  signál,  $Tail$  index označuje polohu nebo signál jednoho okraje klastru,  $Head$  je obsah druhého okraje klastru,  $S_{Avg}$  je průměrná velikost signálu vnitřních pixelů a  $X_{HT}$  je výsledná poloha průsečíku dráhy nabitě částice.

Porovnáním rekonstruované polohy průsečíku dráhy nabitě částice se simulovanou přesnou polohou nebo rekonstruovanou z nafitované dráhy můžeme pozorovat systematickou odchylku polohy v rozmezí  $\pm 15 \mu\text{m}$ . Při požadované rozlišovací schopnosti detektoru pod  $10 \mu\text{m}$  je odchylka dobře měřitelná. Analogický efekt je pozorovatelný u stripových detektorů a řeší se tzv  $\eta$ -korekcí [24] určenou z velikosti signálu na sousedních stripech. Zvyšováním přesnosti pixelových detektorů proto vznikl požadavek vyvinout korigující mechanismus na posun polohy rekonstruovaného průsečíku a jeho chyby.

Systematické odchylky rekonstruované polohy od skutečné polohy průsečíku pixelového detektoru budou ukázány na detektorech DEPFET, popsány v části 3.3 (Obr. 22) a připravovaných pro experiment Belle II. Existence odchylek byla ukázána už na testech na svazcích s kvalitním teleskopovým systémem, umožňujícím určovat přesnost průletu částice s mikronovou přesností.

Následující témata prezentovaná v této kapitole autor rozpracovává a řeší.

#### 4.1 Metody klasifikace, třídění a relevance korekcí

Existence systematických odchylek rekonstruované polohy a odhadu její chyby byla pozorována na výsledcích z testovacích svazků na některých typech tvarů klastrů. Po podrobnějším průzkumu a ověření simulacemi byly určeny základní vlivy na odchylky. Byla to především závislost na tvaru klastru a na směru letu částice přes detektor. K dispozici máme také informaci o celkovém sebraném náboji v klastru a o velikosti signálu v jednotlivých pixelech tvořících klastr. Na histogramu odchylek rekonstruované polohy klastrů tvaru "L" je ukázka významné systematické odchylky, kde je vidět, že odchylky jsou v průměru soustředěné mimo střed, obrázek 22. Úlohou korekcí je eliminace těchto odchylek.

Jako systematický přístup se nabízí třídění podle úhlů průletu částice vůči rovině detektoru a klastrů podle jeho vlastností (tvar klastru, velikost náboje klastru) do skupin se stejnou odchylkou polohy a její chybou. Takto identifikované skupiny pak můžeme korigovat. Pro počáteční vyzkoušení metody bylo zvoleno zjednodušené řešení využívající jen informace o úhlu průletu částice a o tvaru klastru<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Z testovacích svazků máme zkušenost o vlivu celkového náboje v klastru - když ho například rozdělíme na

Faktorem určujícím akceptování korekce je jejich významnost. Zvolená kritéria jsou popsána v části 5.2.2. Vlivy na korekce jsou stručně zmíněny v části 5.2.4.

Dalším zajímavým využitím informací o kombinacích parametrů klastru a dráhy prolétající částice je vyloučení klastrů nesplňujících podmínky jejich vzniku. Typicky, v oblastech senzorů s průlety částic pod velkým úhlem a vytvářejících klastry větší než 1 v některém směru, nemůžou vznikat klastry velikosti  $1 \times 1$ , a proto, pokud se vyskytnou, budou způsobeny pozadím a mohou se vyloučit z analýzy. Tento důsledek může významně snížit vliv pozadí a snížit tím nalézání neexistujících falešných drah.

## 4.2 Určení odchylky a chyby polohy průletu částice

Systematickou odchylku rekonstruované polohy klastru určíme jako průměr všech odchylek pro dané podmínky výběru<sup>2</sup>.

Průměrnou chybu klastru srovnáme s rozptylem polohy klastru od skutečného místa průletu částice (ze simulace nebo z fitu dráhy částice) pro daný výběr. Jejich poměr je pak faktorem, kterým můžeme korigovat chybu polohy klastru k realističtější skutečné hodnotě.

Při fitování dráhy částice je nutné izolovat měřený klaster, aby nevnášel svoji chybu do fitu. Fit dráhy částice nesmí použít informaci od měřeného klastru, říkáme, že fit je nebiasovaný a klaster je z něj vyjmutý. Potom platí:

$$\sigma_{True}^2 = \sigma_{Residual}^2 - \sigma_{Track}^2 \quad (5)$$

kde  $\sigma_{True}$  je skutečná průměrná chyba klastru,  $\sigma_{Residual}$  je chyba (RMS) změřeného rozdělení odchylek,  $\sigma_{Track}$  je průměr průmětů chyb fitovaných drah do roviny senzoru.

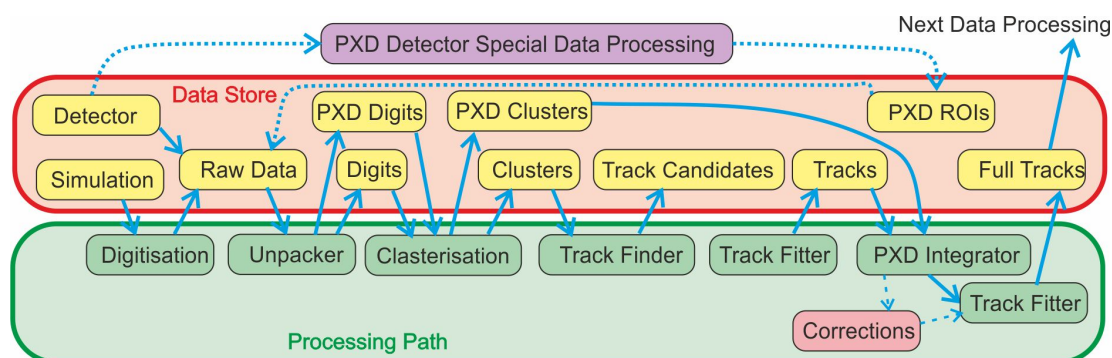
Chyby polohy klastru nejsou obecně nekorelované hodnoty v rovině senzoru, podobně i chyba z fitu dráhy v sobě obsahuje nenulový nediagonální člen kovarianční matice. V prvním přiblížení můžeme korigovat oba směry nezávisle (rovnice (5)), získaná chyba polohy může být v tomto případě větší než skutečná. Řešením je použití symetrické kovarianční chybové matice  $2 \times 2$  s nenulovým nediagonálním členem. Spolu s podobnou kovarianční maticí z fitu dráhy můžeme získat realističtější určení chyby polohy klastru vztahem (6).

$$\begin{pmatrix} \sigma_{True,u}^2 & \sigma_{True,u,v}^2 \\ \sigma_{True,u,v}^2 & \sigma_{True,v}^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_{Residual,u}^2 - \sigma_{Track,u}^2 & \sigma_{Residual,u,v}^2 - \sigma_{Track,u,v}^2 \\ \sigma_{Residual,u,v}^2 - \sigma_{Track,u,v}^2 & \sigma_{Residual,v}^2 - \sigma_{Track,v}^2 \end{pmatrix} \quad (6)$$

kde indexy odpovídají značení rovnice (5), indexy  $u$  a  $v$  jsou lokální souřadnice v rovině senzoru. V případech, kdy matice vpravo není pozitivně definitní, není možné získat korekci, důvodem je významné negaussovské rozdělení chyb drah.

<sup>2</sup>5 stejných kvantilů, má smysl korigovat střední 3 kvantily nezávisle. Nejnižší energie jsou většinou z klastrů  $1 \times 1$  a k nim se korekce polohy neurčuje; nejvyšší energie jsou zase ovlivněné vznikem  $\delta$ -elektronu a jejich poloha má velký rozptyl už z tohoto důvodu. Vliv rozložení náboje po jednotlivých pixelech zatím zkoumán nebyl a může přinést další zpřesnění rekonstruované polohy klastrů.

<sup>2</sup>Obecně se vybraný soubor dat neřídí normálním rozdělením, a proto pro zmírnění vlivu extrémních odchylek odebereme prvních a posledních 5% dat a spočítáme střední hodnotu odchylky a její RMS. Pro výsledné RMS použijeme korekci kvůli ořezané statistice z okrajů rozdělení odchylek.



**Obr. 23:** Belle II: schéma zpracování dat v basf2, v místě "Corrections" se vkládají korekce popisované v této práci.

## 5 Řešení korekcí v experimentu Belle II

Experiment Belle II [25] vytvořil programové prostředí nazvané basf2, inspirované starším prostředím basf v předchozím experimentu Belle [26] a novějšími přístupy použitými například v Athena experimentu ATLAS v CERN [27]. Zvolené řešení využívá C++ programování s využitím Python skriptů a s podporou pro počítání na grid sítích.

Programové prostředí basf2 umožňuje simulaci celého experimentu Belle II. Zároveň slouží na vyhodnocení dat nabraných v reálném experimentu tak, aby tok dat napojilo na stejnou analýzu jako data ze simulací. Toto umožňuje synchronizovat měřené a simulované hodnoty a doladovat simulace podle skutečnosti.

Zpracování informace z vnitřních křemíkových detektorů je následovné (Obr. 23):

1. Zdrojová data z experimentu nebo ze simulací.
2. Digitizace - konverze dat do formátu basf2 objektu a příprava signálu z jednotlivých detekčních prvků.
3. Klasterizace - pospojování informace do klastrů a určení bodů průletu v prostoru (rekonstruování polohy, hit).
4. Hledání kombinací hitů do tzv. kandidátů na dráhy na základě informace z dalších subdetektorů kromě PXD (Track Finding).
5. Určení nejpravděpodobnější dráhy průletu a její přesné nafitování (Track Fitting).
6. Prodloužení dráhy do PXD vrstev detektorů a přidání hitů z PXD.
7. Nové nafitování včetně PXD, místo, kam se přidávají případné korekce polohy.
8. Pokračování v analýze.

Belle II experiment využívá pro dvě vnitřní vrstvy dráhového detektoru pixelové detektory typu DEPFET. Jejich polohové rozlišení očekáváme v rozsahu 5 - 10 $\mu$ m. Korekce systematického posunu polohy je viditelná a důležitá. V současnosti je testovaná a aplikovaná do kódu níže popsaným mechanismem. Tato část je mírně specializovaná a slouží jako příklad, jak se dají systematické efekty popsané v části 4 implementovat.

Autor korekci popsanou v této kapitole řeší, vkládá do kódu a je za ni zodpovědný v experimentu Belle II.

## 5.1 Simulace, digitizace a klasterizace odezvy detektorů

Odezva detektorů je simulována tak, aby odpovídala našim představám o tom, jak detektory fungují, a aby věrně odpovídala reálně získaným datům. Správnost simulace je potvrzována také laboratorními testy a testovacími svazky popsanými v části 3. Proces se dá rozdělit na simulaci nebo vznik náboje průletem částice senzorem, jeho sebrání a zesílení elektronikou a digitalizace AD převodníkem a přenos do prostředí basf2 na další zpracování. Z klastru se určuje poloha průletu částice metodou určení těžiště (Centre of Gravity, COG) v kombinaci s Head-Tail metodami pro větší klastry.

Následují kroky hledající dráhy částic v různých kombinacích klastrů (Track Finder), fitující nalezené kombinace (Track Fitter) a filtrující dráhy tak, aby zůstaly jen ty nejpravděpodobnější a vyloučily se falešné dráhy. Protože v této fázi už máme k dispozici informaci o směru průletu částice, tady můžeme začít uvažovat o aplikování možných korekcí.

## 5.2 Korekce polohy a její chyby

Korekce aplikované na zpřesnění polohy klastrů a zpřesnění jejich chyby vyžadují znalost směru průletu částice. Korekce se zároveň mohou měnit v závislosti na zkvalitňování software a je nežádoucí ztratit původní polohy klastrů. Zpřesněné polohy umožňují lepší fitování dráhy, ale nepomůžou zásadně při hledání možných drah.

Tyto podmínky umožňují nalézt optimální místo, kde a jak aplikovat korekce: když se Track Fitter, nebo jakýkoli jiný softwarový modul, dotazuje na polohu klastru a jeho chybu, klasterizer, pokud je přiložená informace o směru dráhy a existuje seznam korekcí, aplikuje korekci.

Samotné určení korekcí můžeme rozdělit na několik kroků.

### 5.2.1 Příprava dat

Korekce se počítají z velkého souboru skutečných poloh průsečíků (simulace) nebo nafitovaných drah<sup>3</sup>. Nevýhodou využití nafitované dráhy je její možná velká nepřesnost v místě roviny senzoru detektoru. Na druhou stranu nám tento přístup umožní porovnání reálných dat a simulované odezvy detektoru. Takto můžeme doladovat simulaci do maximální shody se skutečností. Korekce v plném rozsahu možných úhlů průletu se dá určit ze simulací.

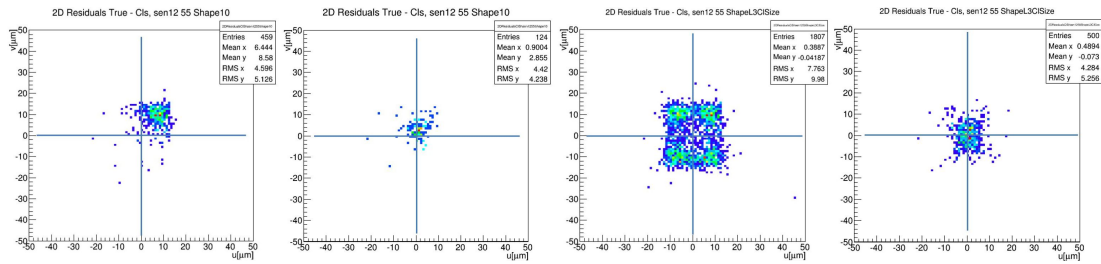
Všechna potřebná data jsou uložena do jednoduchých n-tic. Pro korekce do všech úhlů bylo potřeba 10 milionů událostí (eventů), pro Belle II geometrii postačovaly 2 miliony eventů.

### 5.2.2 Výpočet korekcí

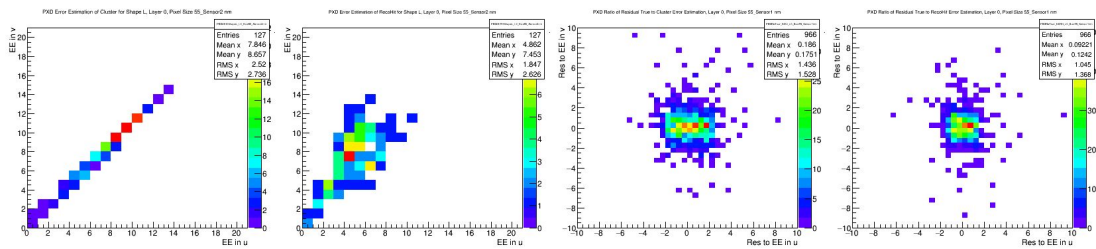
V dalším kroku je nutné spočítat korekce pro dané podmínky podle postupu popsaném v části 4.2. Výsledky se ukládají do souboru nebo databáze. Pro praktické použití je

---

<sup>3</sup>fitování dráhy pro potřeby korekcí: je potřeba použít výhradně odchylky (residuals) získané z fitu s vyloučeným detektorem, pro který korekci určujeme, tzv. nebiasované nebo excluded residuals



**Obr. 24:** Systematické posunutí rekonstruovaných poloh průletu částice od skutečných před a po korekci, pro klastry tvaru "L" v jednom natočení (vlevo) a pro všechny klastry "L", komentář v textu.



**Obr. 25:** Pro klastry tvaru "L" hodnoty odhadu chyby před a po korekci (vlevo) a poměr skutečné odchylky k odhadované chybě před a po korekci. Komentář v textu.

vhodné srovnat výsledky ze simulací a z reálných dat, pokud je máme k dispozici, a v případě nesouladu je potřeba simulace vyladit. Ukázka aplikace korekcí je na Obr. 24, kde se korigovala průměrná odchylka  $\approx 8 \mu\text{m}$  (vlevo) a původní rozptyl odchylek se zlepšil z  $\text{RMS} \approx 8 - 10 \mu\text{m}$  na  $\text{RMS} \approx 4 - 5 \mu\text{m}$  (vpravo).

Podstatnou podmínkou aplikace korekcí je jejich významnost. Součástí výpočtu korekcí je určení jejich chyby. Korekce polohy jsou odchylky od skutečné polohy, které se k rekonstruované poloze přičítají. Pokud ale jejich velikost je menší než  $3\sigma$  korekce ( $\sigma$  je spočítaná chyba korekce), korekce není uložena a nebude se aplikovat na polohu. Korekce menší než  $0.1\mu\text{m}$  se ignorují a neaplikují se.

Korekce odhadu chyby polohy se určuje jinak: je to faktor, kterým násobíme existující odhad chyby tak aby se přiblížila skutečnému rozptylu odchylek. Tady je podobně jako u poloh zvolena podmínka akceptace: změna faktoru musí být odlišná alespoň  $3\sigma$  chyby korekce.

Ukázka korekcí chyby je na Obr. 25. Vlevo je ukázka korekce chyby z  $\approx 8 \mu\text{m}$  na  $\approx 5 \mu\text{m}$ , v pravé části je vyneseno poměr skutečného rozptylu k odhadované chybě před a po korekci. Realistický poměr musí být kolem hodnoty 1, je viditelná změna z 1,4 na 1,0 ve směru osy u.

### 5.2.3 Aplikace korekcí

Korekci aplikujeme v případě požadavku, aby klastř odeslal svoji polohu a její chybu. Korekce se v inicializační fázi programu uloží do paměti pro rychlou manipulaci s nimi. Součástí požadavku na polohu klastřu je informace o směru letu částice vůči rovině senzoru, další potřebné informace k výběru korekce obsahuje samotný objekt klastřu. Po kontrole, že existuje seznam korekcí, funkce vybere a aplikuje příslušnou korekci do návratové informace

o poloze a její chybě. Původní hodnota polohy a chyby klastru zůstává nezměněná.

Přidaná časová náročnost této operace je ve srovnání s ostatními funkcemi, jako je hledání a fitování dráhy, malá a nezvyšuje viditelně dobu výpočtu.

#### 5.2.4 Validace výsledných korekcí

Přirozenou součástí korekcí je kontrola jejich správnosti, validace výsledku. V basf2 k tomu slouží moduly kontroly kvality dat (Data Quality Monitors, DQM). Korekce polohy a její chyby je výhodné kontrolovat na klastrech tvaru "L", které ukazují největší systematickou odchylku polohy bez ohledu na rozložení náboje v klastru. Jsou zastoupeny v asi 6% dat a pro kolmé průlety částic typické pro testování na svazcích tvoří méně než 1% z klastrů, což komplikuje jejich validaci. Validace na výsledcích na testovacích svazcích je před začátkem experimentu jedinou cestou, jak sladit simulace s reálnými detektory z pohledu korekcí polohy klastru a její chyby.

Samotná validace odchylek průsečíků spočívá v kontrole histogramu odchylek před a po korekcích. Na 2-rozměrném grafu distribuce odchylek v rovině senzoru můžeme pozorovat 4 významné koncentrace odchylek tvořící čtverec nebo obdélník. Po aplikaci korekcí se tyto oblasti přesunou do středu a významně se zmenší RMS distribuce, příklady jsou na obrázcích 24 a 25.

Validace korigované chyby polohy klastru využívá předpoklad, že chyba polohy koreponduje s distribucí odchylek, a proto střední hodnota poměru odchylky k její chybě by měla oscilovat kolem 1. Situace je komplikovaná korelacemi chyby polohy v rovině senzoru, a proto je potřeba pracovat s kovariančními maticemi chyb odchylek, jak je ukázáno v části 4.2.

Na závěr této části je nutné upozornit na citlivost korekcí na změny v simulacích nebo nastavení senzorů, změny v digitizéry (simulace převodu signálu z amplitudy signálu na číslo, odpovídající informaci ze skutečného měření v experimentu), klasterizéry (spojení informací z detekčních elementů do polohy klastru, a tedy bodu průletu částice) a změny ve fitovacích funkcích (hlavně z důvodu optimalizace účinnosti nacházení drah a potlačení falešných neexistujících drah). Proto pokud se změní distribuce odchylek nebo jejich chyb před a po korekcích, je potřeba zopakovat proceduru nastavení korekcí. V současnosti tato procedura trvá 1 - 2 dny práce nad simulacemi.

Protože je malá pravděpodobnost ovlivnění korekce nekorigovaným klastrem, pro dostatečné zpřesnění poloh klastrů zatím dostačuje jedna iterace korekcí. Je možné aplikovat několik iterací korekcí.

#### 5.2.5 Ladění korekcí na reálných datech - testovací svazek

Ladění korekcí na reálných datech nebo testovacím svazkem umožňuje správné nastavení simulací a digitizéry pixelu. Pokud jsou tyto moduly správně nastavené, výsledky simulace a z reálných dat se budou shodovat před i po korekcích na "L" tvarech klastrů. Pak můžeme považovat i ostatní korekce za validní.

Korekce počítané z reálných dat jsou zatíženy výrazně větší chybou oproti simulacím se známým skutečným průsečíkem. Je to způsobeno použitím fitovaných drah částic zatížených vlastní chybou polohy. Umožňují korigovat jen největší odchylky. Tato informace by se



měla shodovat mezi simulací a reálnými daty a měla by se blížit ke skutečným korekcím z simulovaných průsečíků drah.

## Závěr

V této práci jsem se pokusil shrnout tři základní přístupy k testování křemíkových detektorů určených pro moderní částicové experimenty fyziky vysokých energií: testování reálným svazkem, zářičem a laserem, všechny rozvíjené na našem pracovišti v Praze. Druhá část se věnuje popisu systematických efektů při rekonstrukci polohy průsečíku částic a její chyby u moderních pixelových křemíkových detektorů, které se díky vývoji technologií a výraznému zlepšení rozlišovacích schopností detektorů staly měřitelnými. V poslední části ukazují příklad korekce těchto efektů na dokončovaném experimentu Belle II v Japonsku pro použité monolitické pixelové detektory DEPFET.

## Poděkování

Výsledky předložené v této práci vznikaly ve spolupráci s mnoha kolegy a studenty Ústavu částicové a jaderné fyziky MFF UK, a v kolaboracích RD50 a ATLAS v CERNu a Belle II v KEK. Rád bych jmenoval hlavně kolegy Z. Doležala, P. Kvasničku, P. Řezníčka a B. Schwenkera. Velmi oceňuji podporu vedení ÚČJF i MFF při budování experimentálního pracoviště a laboratoře vysoké čistoty, bez kterých by výše zmíněné výsledky a řešení vzniknout nemohly, stejně jako by neexistovaly bez finanční podpory převážně z grantů GAČR a MŠMT.

Chci poděkovat manželce Elišce za jazykovou kontrolu a své rodině za toleranci, bez které bych tuto práci nikdy nesepsal.

## Literatura

- [1] *ATLAS inner detector: Technical Design Report, 1*, Technical Design Report ATLAS, CERN, Geneva, 1997
- [2] Abdesselam A. et al., *The ATLAS semiconductor tracker end-cap module*, NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS RESEARCH SECTION A-ACCELERATORS SPECTROMETERS DETECTORS AND ASSOCIATED EQUIPMENT **575** (2007), 353–389, doi: {10.1016/j.nima.2007.02.019}
- [3] Broklova Z. et al., *SCT End-Cap Module Description In Athena Framework*, Technical Report ATL-INDET-INT-2005-001. CERN-ATL-INDET-INT-2005-001. ATL-COM-INDET-2005-006, CERN, Geneva, 2005
- [4] *LHC Schedule according to MTP2015*, 2017, viditelné: <http://hilumilhc.web.cern.ch/about/h1-lhc-project>, [cit. 2017-10-25]
- [5] Gregor I.M. et al., *Technical Design Report for the ATLAS ITk- Strips Detector: Draft for the ATLAS Circulation*, Technical Report ATL-COM-UPGRADE-2016-040, CERN, Geneva, 2017

- [6] Abe T. et al., *Belle II Technical Design Report*, Technical Report arXiv:1011.0352. KEK REPORT 2010-1, 2010, comments: Edited by: Z. Doležal and S. Uno
- [7] Broklova Z. et al., *SCT module testing system at Charles University in Prague*, Technical Report ATL-INDET-2004-003, CERN, Geneva, 2003
- [8] *Laboratoře křemíkových detektorů na ÚČJF MFF UK*, 2017, viditelné na: <http://www-ucjf.troja.mff.cuni.cz/kodys/works/lab/index.html>, [cit. 2017-10-25]
- [9] Dolezal Z. et al., *Beamtests of Prototype ATLAS SCT Modules at CERN H8 in 2000* (2001)
- [10] Sýkora M., *Tests of Semiconductor Detectors for ATLAS Upgrade (Master thesis)*, MFF UK, Prague, 2017, master thesis
- [11] Bazant P. et al., *Laser measurement of absolute charge collection efficiency of a silicon detector*, NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS RESEARCH SECTION A-ACCELERATORS SPECTROMETERS DETECTORS AND ASSOCIATED EQUIPMENT **581** (2007), 306–309, doi: {10.1016/j.nima.2007.07.128}, 11th International Vienna Conference on Instrumentation, Vienna, AUSTRIA, FEB 19-24, 2007
- [12] Dolezal Z. et al., *Laser tests of silicon detectors*, NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS RESEARCH SECTION A-ACCELERATORS SPECTROMETERS DETECTORS AND ASSOCIATED EQUIPMENT **573** (2007), 12–15, doi: {10.1016/j.nima.2006.10.319}, 7th International Conference on Position-Sensitive Detectors, Univ Liverpool, Liverpool, ENGLAND, SEP 09-13, 2005
- [13] Andricek L. et al., *Laser tests of the DEPFET gated operation*, JOURNAL OF INSTRUMENTATION **8** (2013), doi: {10.1088/1748-0221/8/01/C01051}, Topical Workshop on Electronics for Particle Physics, Oxford, ENGLAND, SEP 17-21, 2012
- [14] Barr A.J. et al., *Beamtests of Prototype ATLAS SCT Modules at CERN H8 in June and August 2000*, Technical Report ATL-INDET-2002-005, CERN, Geneva, 2001
- [15] Barr A.J. et al., *Results from an LHC-structured beamtest of SCT prototype modules*, Technical Report ATL-INDET-2002-025, CERN, Geneva, 2002
- [16] Mangin-Brinet M. et al., *Electrical test results from ATLAS-SCT end-cap modules*, Technical Report ATL-INDET-2003-004, CERN, Geneva, 2003, revised version number 1 submitted on 2003-08-14 13:37:29
- [17] Andricek L. et al., *Intrinsic resolutions of DEPFET detector prototypes measured at beam tests*, NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS RESEARCH SECTION A-ACCELERATORS SPECTROMETERS DETECTORS AND ASSOCIATED EQUIPMENT **638** (2011), 24–32, doi: {10.1016/j.nima.2011.02.015}
- [18] Velthuis J.J. et al., *DEPFET, a monolithic active pixel sensor for the ILC*, NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS RESEARCH SECTION A-ACCELERATORS SPECTROMETERS DETECTORS AND ASSOCIATED EQUIPMENT **579** (2007), 685–689, doi: {10.1016/j.nima.2007.05.278}, 6th International

Symposium on Development and Application of Semiconductor Tracking Detectors, Carmel, CA, SEP 11-15, 2006

- [19] Ahmad A. et al., *The Silicon Microstrip Sensors of the ATLAS SemiConductor Tracker*, Technical Report ATL-INDET-PUB-2007-007. ATL-COM-INDET-2007-008. CERN-ATL-COM-INDET-2007-008. 1, CERN, Geneva, 2007
- [20] Aad G. et al., *The ATLAS Inner Detector commissioning and calibration*, Eur. Phys. J. C **70** (2010), 787–821. 34 p, comments: 34 pages, 25 figures
- [21] Andricek L. et al., *Spatial resolution analysis of micron resolution silicon pixel detectors based on beam and laser tests*, NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS RESEARCH SECTION A-ACCELERATORS SPECTROMETERS DETECTORS AND ASSOCIATED EQUIPMENT **604** (2009), 385–389, doi: {10.1016/j.nima.2009.01.097}, 8th International Conference on Position Sensitive Detectors, Univ Glasgow, Glasgow, SCOTLAND, SEP 01-05, 2008
- [22] Broklová Z., *Simulations of ATLAS silicon strip detector modules in ATHENA framework*, 2004, Diplomová práce
- [23] Gluckstern R., *Uncertainties in track momentum and direction, due to multiple scattering and measurement errors*, NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS **24** (1963), 381–389, doi: {10.1016/0029-554X(63)90347-1}
- [24] Turchetta R., *Spatial resolution of silicon microstrip detectors*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment **335** (1993), 44–58
- [25] *Oficiální stránky experimentu Belle II*, 2017, viditelné na: <https://www.belle2.org>, [cit. 2017-10-25]
- [26] *Oficiální stránky experimentu Belle*, 2017, viditelné na: <https://belle.kek.jp>, [cit. 2017-10-25]
- [27] *Oficiální stránky programového prostředí Athena experimntu ATLAS*, 2017, viditelné na: <https://atlassoftwaredocs.web.cern.ch/athena>, [cit. 2017-10-25]

## 6 Publikace související s předkládanou habilitační prací

### 6.1 Testování křemíkových detektorů v pražské laboratoři

V této části je výběr publikací (jedna interní zpráva kolaborace ATLAS a dva články) souvisejících s mými pracemi na testování křemíkových detektorů zářičem nebo laserem v pražské laboratoři, kde jsem hlavním nebo jedním z hlavních autorů, případně školitelem studentů.

V první práci je popsán systém udržení kvality v laboratoři CR1 pro produkci SCT modulů, který jsem spoluvytvářel.

Druhá práce ukazuje mé originální měření sebraného náboje laserem a v absolutních hodnotách po nakalibrování laseru.

Třetí práce, kde jsem hlavním autorem, popisuje vlastnosti testování modulů laserem.

- Broklova Z. et al., *SCT module testing system at Charles University in Prague*, Technical Report ATL-INDET-2004-003, CERN, Geneva, 2003
- Bazant P. et al., *Laser measurement of absolute charge collection efficiency of a silicon detector*, NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS RESEARCH SECTION A-ACCELERATORS SPECTROMETERS DETECTORS AND ASSOCIATED EQUIPMENT **581** (2007), 306–309, doi: {10.1016/j.nima.2007.07.128}, 11th International Vienna Conference on Instrumentation, Vienna, AUSTRIA, FEB 19-24, 2007
- Dolezal Z. et al., *Laser tests of silicon detectors*, NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS RESEARCH SECTION A-ACCELERATORS SPECTROMETERS DETECTORS AND ASSOCIATED EQUIPMENT **573** (2007), 12–15, doi: {10.1016/j.nima.2006.10.319}, 7th International Conference on Position-Sensitive Detectors, Univ Liverpool, Liverpool, ENGLAND, SEP 09-13, 2005

## 6.2 Testování modulů ATLAS SCT a jejich vyhodnocování na testovacích svazcích

V této části je výběr publikací (dvě interní zprávy kolaborace ATLAS a jeden článek) souvisejících s mou prací při vývoji, testování a produkci SCT modulů pro ATLAS experiment. Můj podíl byl hlavně v práci na testech na testovacích svazcích a analýze nabraných dat, na vývoji ve Freiburgu (15 měsíců) a produkci ve Valencii (12 měsíců) a při vedení studentů pracujících na těchto tématech. Řešeno pro ATLAS kolaboraci.

V první práci je popsáno vložení EC SCT modulů do programového prostředí Athena s kompletní dokumentací vložených parametrů, práce byla mnou realizovaná a vedená jako školitelem.

Druhá práce představuje výslednou zprávu z testů SCT na svazku v CERN, kde jsem byl jedním ze dvou hlavních řešitelů analýzy a interpretace výsledků.

Třetí práce shrnuje výsledky předchozích dvou prací a uvádí výsledky hromadné produkce SCT modulů. Jsem zde spoluautor.

- Broklova Z. et al., *SCT End-Cap Module Description In Athena Framework*, Technical Report ATL-INDET-INT-2005-001. CERN-ATL-INDET-INT-2005-001. ATL-COM-INDET-2005-006, CERN, Geneva, 2005
- Dolezal Z. et al., *Beamtests of Prototype ATLAS SCT Modules at CERN H8 in 2000* (2001)
- Abdesselam A. et al., *The ATLAS semiconductor tracker end-cap module*, NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS RESEARCH SECTION A-ACCELERATORS SPECTROMETERS DETECTORS AND ASSOCIATED EQUIPMENT **575** (2007), 353–389, doi: {10.1016/j.nima.2007.02.019}

### 6.3 Testování modulů DEPFET a jejich vyhodnocování na testovacích svazcích

V této části je výběr publikací souvisejících s mými pracemi na testování křemíkových detektorů zářičem nebo laserem v pražské laboratoři, kde jsem hlavním nebo jedním z hlavních autorů, případně školitelem řešitelů studentů. Řešeno pro Belle II kolaboraci.

V první práci je publikován výsledek měření DEPFET detektoru v naší laboratoři. Detektor byl poprvé změřen v režimu "gated mode", práci jsem řešil, vedl a školil studenta - hlavního autora.

Druhá a třetí práce ukazují výsledky testů DEPFET detektorů v pražské laboratoři laserem a na testovacím svazku v CERN, zde jsem hlavní řešitel a hlavní autor publikací.

Čtvrtá práce ukazuje vhodnost DEPFET detektorů pro připravovaný experiment ILC, využívá výsledky našich testů a analýz a jsem jedním z významných autorů.

- Andricek L. et al., *Laser tests of the DEPFET gated operation*, JOURNAL OF INSTRUMENTATION **8** (2013), doi: {10.1088/1748-0221/8/01/C01051}, Topical Workshop on Electronics for Particle Physics, Oxford, ENGLAND, SEP 17-21, 2012
- Andricek L. et al., *Intrinsic resolutions of DEPFET detector prototypes measured at beam tests*, NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS RESEARCH SECTION A-ACCELERATORS SPECTROMETERS DETECTORS AND ASSOCIATED EQUIPMENT **638** (2011), 24–32, doi: {10.1016/j.nima.2011.02.015}
- Andricek L. et al., *Spatial resolution analysis of micron resolution silicon pixel detectors based on beam and laser tests*, NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS RESEARCH SECTION A-ACCELERATORS SPECTROMETERS DETECTORS AND ASSOCIATED EQUIPMENT **604** (2009), 385–389, doi: {10.1016/j.nima.2009.01.097}, 8th International Conference on Position Sensitive Detectors, Univ Glasgow, Glasgow, SCOTLAND, SEP 01-05, 2008
- Velthuis J.J. et al., *DEPFET, a monolithic active pixel sensor for the ILC*, NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS RESEARCH SECTION A-ACCELERATORS SPECTROMETERS DETECTORS AND ASSOCIATED EQUIPMENT **579** (2007), 685–689, doi: {10.1016/j.nima.2007.05.278}, 6th International Symposium on Development and Application of Semiconductor Tracking Detectors, Carmel, CA, SEP 11-15, 2006