

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Czech Technical University in Prague

Faculty of Nuclear Sciences and Physical Engineering

Autor RNDr. Vojtěch Petráček, CSc.

Studium jaderných srážek v experimentu ALICE na urychlovači LHC.

Study of heavy ion collisions with ALICE experiment at LHC.

Summary

This lecture is an overview of heavy-ion physics program of the ALICE experiment at the LHC. Experiment ALICE is the only LHC experiment devoted to study of nuclear collisions. ALICE is the last in a series of heavy ion experiments which were performed at CERN and BNL and will reveal information about properties of nuclear matter produced at highest collision energies available. It will open up the unique opportunity to study strongly interacting matter under extreme temperatures and pressure and to test our understanding of thermalization process and fireball evolution.

The lecture reviews the experimental setup of the ALICE detector, its physics program and highlights contribution of the author in detector preparation and data analysis.

The ALICE detector is designed for a complex study of properties of heavy-ion collision. Matter produced in this collision is in an extremely hot and compressed state, similar to the matter of the universe in $\approx 1\mu s$ of its age.

In contrast to the Big Bang, we are able to produce this state of matter only in a limited volume defined by the overlap of colliding nuclei. This volume limitation has significant influence on properties of the system and its evolution. Most significant differences are observed in the phase structure, namely on properties of the phase transition (crossover) between deconfined and hadronic phases. The study of properties of this phase transition is one of the main goals of the ALICE experiment.

In order to be able to study properties of the deconfined matter, we have to understand all phases of the nucleus-nucleus collision - the initial phase when the equilibrated deconfined matter is formed, expansion and cooling of the deconfined medium, hadronization and kinetic freezeout when system of produced particles loses its collective behaviour.

ALICE detector will measure momenta of charged particles in full azimuthal coverage. The detector consists of two main parts: the central detector and the muon spectrometer. The central detector is designed for measurement of hadronic signals, di-electron signals and neutral particles. The muon spectrometer will measure muon and di-muon signals and it is designed mainly for the study of properties of quarkonia in deconfined medium.

The central part of the detector has full azimuthal coverage and in pseudorapidity it covers the interval $-0.9 < \eta < 0.9$. For momentum measurement are central detectors placed in the field of solenoidal magnet with $B = 0.4T$. The central detector consist of an inner tracking system ITS, a time projection chamber TPC, a transition radiation detector TRD, a time of flight detector TOF, a high momentum particle identification detector HMPID and a forward detectors measuring charged particle multiplicity (V0, FMD), photon multiplicity (PMD) and timing detector (T0). The V0 detector is used for the estimation of centrality and FMD can measure charged particle multiplicity in pseudo-rapidity interval $-3.4 < \eta < -0.9$ $0.9 < \eta < 5.0$.

The muon spectrometer detects muons with momenta larger than $4 GeV/c$ in polar angle interval $2 - 9^\circ$.

Neutral particles will be identified in the photon spectrometer PHOS which can measure photons with energies up to $\approx 100 GeV$ with high spatial and energetic resolution.

Only the complex simultaneous operation of all detectors can identify particles produced during the nucleus-nucleus collision and measure their properties. Based on this information it will be possible to deduce which processes occurred before the observed particles were produced, in the time, when the nuclear matter was in the deconfined phase.

Souhrn

Přednáška je věnována přehledu problematiky zkoumání ultra-relativistických jaderných srážek v experimentu ALICE na urychlovači LHC budovaném v CERN. Experiment ALICE je jediným LHC experimentem dedikovaným pro studium jaderných srážek. Tento experiment naváže na celou řadu experimentů, jež proběhly nebo probíhají jak v CERN, tak i v Brookhavenské národní laboratoři (BNL), a doplní tak mozaiku dostupných znalostí v oblasti nejvyšších srážkových energií. Otevře se tak možnost zkoumání silně interagující hmoty za extrémních teplot a tlaků a rovněž otestování našeho chápání procesů ustavení rovnovážného stavu při jaderné srážce a jeho následného vývoje.

Přednáška shrnuje experimentální možnosti detektoru ALICE, fyzikální program experimentu a s uvádí konkrétní úkoly na nichž se autor podílí jak v oblasti detektoru, tak i ve fyzikálních analýzách.

Experiment ALICE se bude snažit o komplexní zkoumání jaderné srážky. Při jaderné srážce při vysoké energii se bude vytvářet hmota v extrémně horké a komprimované formě. Předpokládáme, že hmota obdobných vlastností existovala ve Vesmíru v několika mikrosekundách jeho věku.

Na rozdíl od tohoto případu jsme však schopni vytvořit obdobné podmínky pouze v oblasti překryvu dvou srážejících se jader. Tato "konečnost" srážkového systému má důležité důsledky pro procesy v něm probíhající. Zejména patrné jsou rozdíly a změny ve fázové struktuře, zejména u přechodu mezi dekonfinovanou a hadronovou fází. Charakteristiky tohoto přechodu a vlastnosti hmoty v dekonfinované fázi patří mezi základní problémy, na které budeme hledat odpověď.

Abychom mohli studovat vlastnosti hmoty v dekonfinované fázi, musíme dobře porozumět všem fázím jaderné srážky. Počínaje počátečními fázemi, které připravují podmínky pro vznik dekonfinované rovnovážné fáze, přes její vývoj - expanzi a chladnutí, až po její rozpad do hadronů a posléze do okamžiku, kdy vzniklé hadrony ztrácejí vzájemný kontakt.

Detektory experimentu ALICE budou měřit hybnosti a energie nabitých a neutrálních částic v plném azimutálním úhlu. Detektor sestává ze dvou hlavních částí: centrální části určené ke studiu hadronových signálů a dielektronů a mionového spektrometru určeného ke studiu vlastností kvarkonií v jaderné hmotě.

Centrální část má plné azimutální pokrytí a pokrývá pseudorapiditní interval $-0.9 < \eta < 0.9$. Pro měření hybnosti jsou detektory centrální části umístěny v solenoidním magnetu, který bude pracovat s indukcí $B = 0.4T$. Centrální detektor sestává z vnitřního dráhového systému ITS, časově projekční komory TPC, detektoru přechodového záření TRD, detektoru doby lety TOF, detektoru HMPID identifikujícího částice s velkou příčnou hybností a z dopředných detektorů měřících četnost nabitých (V0 a FMD) a neutrálních (PMD) částic, detektoru okamžiku srážky (TO). Detektor V0 slouží k určení centrality srážky a detektor FMD ke studiu četnosti nabitých částic v oblasti $-3.4 < \eta < -0.9$ $0.9 < \eta < 5.0$.

Mionový spektrometr pracuje s miony od hybnosti $4 GeV/c$ a v úhlovém rozsahu $2 - 9^\circ$.

Identifikaci neutrálních částic bude provádět spektrometr PHOS detekující fotony až do energie $\approx 100 GeV/c$ s vysokým energetickým a prostorovým rozlišením.

Pouze kompletní součinností celého detekčního systému lze identifikovat částice vzniklé při jaderné srážce a změřit jejich vlastnosti. Na základě této informace bude pak možné vyslovit se k procesům, jež předcházely vzniku pozorovaných částic, v okamžiku, kdy se jaderná hmota nacházela v dekonfinované fázi.

Klíčová slova:

Fyzika ultra-relativistických jaderných srážek, experiment ALICE, LHC, kvark-gluonové plazma, křemíkové driftové detektory

Keywords:

Heavy-ion physics, nucleus-nucleus collisions, experiment ALICE, LHC, quark-gluon plasma, silicon drift detectors

Obsah

1	Úvod	6
2	Dynamika ultrarelativistické jaderné srážky	6
3	Konstrukce detektoru ALICE	7
3.1	Centrální detektor	8
3.2	Mionový spektrometr	10
3.3	Sběr dat a výběr událostí	10
3.4	Identifikace neutrálních částic	10
3.5	Konstrukce vnitřního dráhového systému	10
3.6	Křemíkové driftové detektory ITS	11
4	Fyzikální program experimentu ALICE	16
4.1	Motivace experimentu ALICE	16
4.2	Geometrie srážky	16
4.3	Produkce částic	17
4.4	Několičástečkové korelace	17
4.5	Kolektivní toky částic	18
4.6	Fyzika v jednotlivých událostech	18
4.7	Produkce těžkých kvarků	19
4.8	Kvarkonia	20
4.9	Produkce fotonů	20
4.10	Energetické ztráty partonů v dekonfinované hmotě	20
4.11	Ultraperiferální jaderné srážky	20
4.12	Fyzika kosmického záření	21
4.13	Další problémy, jež budou studovány	21
4.14	Studium lokalizovaných fluktuací metodami vlnkové analýzy a analýzy s proměnným rozlišením	21
5	Závěr	23
6	Použitá literatura	23
7	RNDr. Vojtěch Petráček, CSc. - životopis	26
7.1	Osobní údaje	26
7.2	Vzdělání	26
7.3	Profesní kariéra	26
7.4	Vědecká aktivita	26
7.5	Pedagogická aktivita	27

1 Úvod

Se spuštěním velkého hadronového urychlovače (LHC) v CERN na konci roku 2007 se pro fyziku ultra-relativistických srážek otevře možnost zkoumání silně interagující hmoty za extrémních teplot a tlaků, které nebyly dosud nikdy experimentálně realizovány. Otevře se tak možnost otestovat naše chápání procesů ustavení rovnovážného stavu při srážce a jeho následného vývoje v rámci kvantové chromodynamiky.

V počátečních fázích jaderné srážky dochází ke vzniku dekonfinované fáze hmoty, ve které se mohou kvarky pohybovat na vzdálenosti mnohonásobně převyšující rozměry hadronů, ve kterých jsou za běžných podmínek uvězněny. Měření na LHC - prováděná zejména detektorem ALICE - budou studovat vlastnosti této fáze hmoty. Experiment ALICE je jediným LHC experimentem dedikovaným pro studium jaderných srážek.

Experiment ALICE naváže na celou řadu experimentů, jež proběhly nebo probíhají jak v CERN, tak i v Brookhavenské národní laboratoři (BNL), a doplní tak mozaiku dostupných znalostí v oblasti nejvyšších srážkových energií. Jak ukazují tyto experimenty je právě možnost studia vlastností kvarkové hmoty v širokém intervalu podmínek její existence velmi důležitá pro správné pochopení jejich vlastností.

Oblast energií dostupných při jaderných srážkách na LHC, převyšujících až 27krát energii dostupnou v současnosti, skýtá rovněž potenciál pro objev nových vlastností a projevů jaderné hmoty a to zejména v počátečních fázích jaderné srážky, kdy jsou k dispozici extrémní hustoty energie a zbrzdění srážejících se jader.

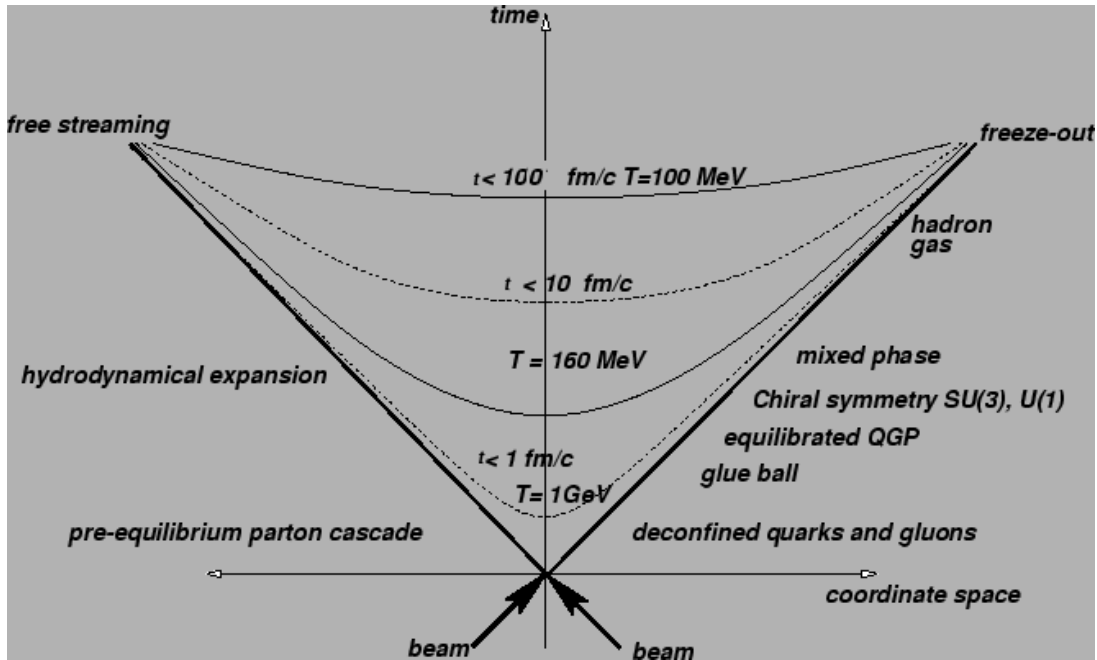
Tato předáška má za cíl seznámit s experimentálními možnostmi detektoru ALICE a nastínit hlavní směry, kterými se bude ubírat experimentální snažení, s ohledem na nejslibnější měřitelné veličiny umožňující studium vlastností hmoty v počátku vývoje jaderné srážky. Volba vhodných měřitelných veličin je v tomto případě klíčová, jelikož v pozdějších fázích vývoje je velké množství informace zastřeno přechodem do hadronové fáze. V závěru přednášky jsou shrnuty směry, jimiž se bude ubírat analýza experimentu v Centru pro fyziku ultra-relativistických jaderných srážek se sídlem na FJFI.

2 Dynamika ultrarelativistické jaderné srážky

Průběh jaderné srážky pozorovaný v soustavě spojené s těžištěm systému připomíná srážku dvou tenkých disků. Jádra jsou zploštělá v důsledku relativistické kontrakce (γ faktor na urychlovači LHC dosahuje 2800). Disky jaderné hmoty se mohou protnout s různou geometrickou vzdáleností jejich středů b , kterou nazýváme impaktní parametr. V případě malého impaktního parametru hovoříme o centrální srážce, v případě jeho větších hodnot hovoříme o srážce periferní. V prvním případě vzniká reakční zóna s kruhovou symetrií, v případě druhém pak zóna eliptického tvaru. V případě, že impaktní parametr je větší než součet poloměrů jader nedochází již k silným interakcím mezi nukleony, ale jádra mohou interagovat v důsledku jejich silných elektrických polí. Tuto situaci nazýváme ultraperiferální srážkou.

V důsledku kolize se část kinetické energie srážejících se částic využije na produkci částic v oblasti centrálních rapidit. Hybnost interagujících nukleonů se sníží, což bývá nazýváno jaderným zastavováním (nuclear stopping).

Jadernou srážku lze z hlediska časového průběhu rozčlenit do několika fází zobrazených na obrázku 2.1. V prvotní fázi, za teplot kolem 710 – 850 MeV [3] (v případě urychlovače LHC), dochází k uvolnění velkého množství kvarků a gluonů v důsledku vysoké koncentrace energie v místě překryvu srážejících se



Obrázek 2.1: Model časoprostorového vývoje jaderné srážky. Anglická terminologie je v oboru převládající a proto byla zachována. Terminologie je vysvětlena v dalším textu. (obrázek převzat z [1])

jader. Tato fáze trvá $\tau < 1 \text{ fm}/c$ a vzniklé částice ještě nejsou v rovnováze (pre-equilibrium). Poté dochází k ustavení rovnováhy mezi kvarky a gluony a vzniká dekonfinovaná fáze kvark-gluonového plazmatu (QGP) [2] [4], které expanduje jako kapalina (hydrodynamical expansion). V důsledku expanze klesá hustota energie systému i jeho teplota.

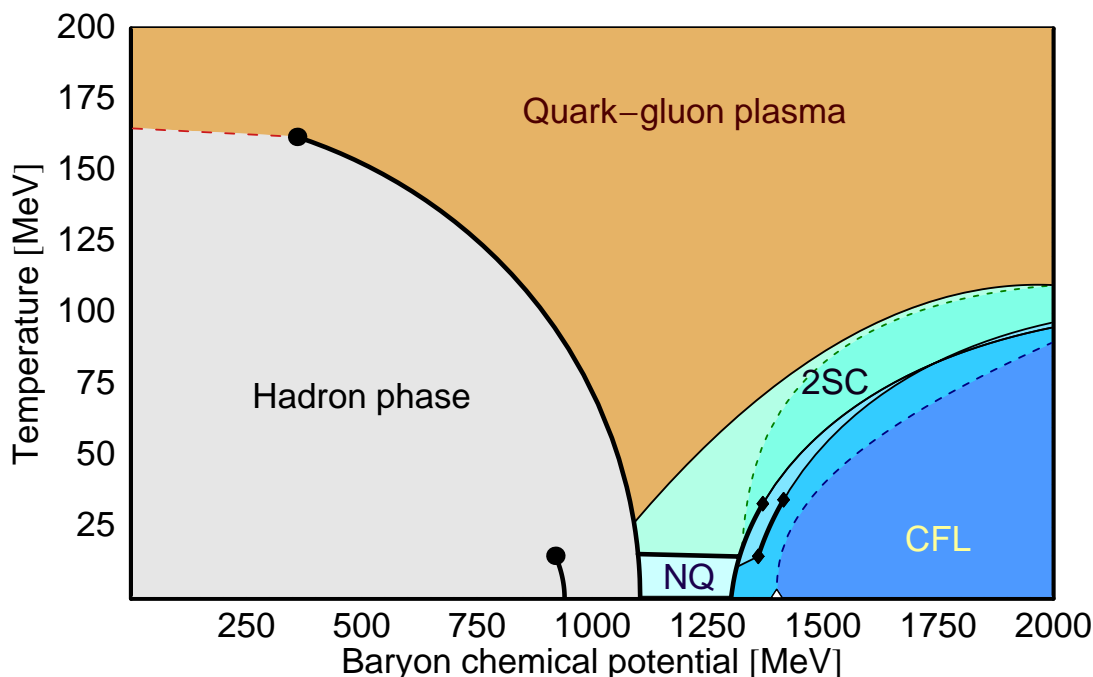
Když v čase několika fm/c dojde k dosažení kritické hodnoty hustoty energie $\approx 1 \text{ GeV}/\text{fm}^3$ a teploty 175 MeV , systém projde fázovým rozhraním a proběhne hadronizace, při které se původně volně se pohybující kvarky a antikvarky spojí do barevně neutrálních objektů - hadronů. Zároveň dojde k narušení chirální symetrie, o které předpokládáme, že platí v předešlých fázích srážky - obdobně, jak tomu bylo i při vývoji vesmíru v prvních μs po velkém třesku. Charakter přechodu mezi fázemi závisí na teplotě a hustotě baryonů. Může se jednat buď o fázový přechod, nebo pouze o rychlý přechod (crossover). Zjištění charakteru této fázové změny je jedním z cílů experimentálního studia.

Tento přechod nenastává ve všech oblastech systému ve stejném vlastním čase, po jistou dobu existuje tedy smíšená fáze dekonfinované a hadronové hmoty. Po ukončení hadronizace je systém stále ještě velice hustý a stále dochází k silným interakcím. Nemění se však již prakticky poměry počtů vzniklých částic. To je nazýváno chemickým vymrznutím (chemical freezeout).

Hadronová hmota se řídí jinou stavovou rovnicí než dekonfinované médium. Proto v hadronové fázi již nedochází k tak intenzivnímu utváření kolektivních toků, jako ve fázi dekonfinované.

V čase řádově $100 \text{ fm}/c$ dochází již k takovému zředění systému, že v něm v podstatě ustávají interakce. To se nazývá kinetickým vymrznutím (kinetic freezeout), kterému odpovídá teplota $100 - 120 \text{ MeV}$. Tím končí kolektivní vývoj kolizní oblasti a částice se dále pohybují volně směrem k detektorům.

Zmíňme na tomto místě rovněž fázový diagram QCD (na obrázku 2.2). Se vzrůstající energií jaderné srážky zůstává v oblasti produkce částic stále méně nukleonů ze srážejících se jader a tudíž klesá i čistá baryonová hustota (net baryon density ($n_{\text{baryon}} - n_{\text{anti-baryon}}$)) a tudíž i baryochemický potenciál. Vznikající hmota se tedy nachází v oblasti vysoké teploty a nízkého baryochemického potenciálu.



Obrázek 2.2: Fázový diagram QCD. Jaderná hmota se za běžných podmínek vyskytuje v oblasti (v této škále) nulové teploty a baryochemického potenciálu $\approx 1 \text{ GeV}$. Urychlovačové experimenty zkoumají oblast vysokých teplot a nízkého baryochemického potenciálu. Linie skutečného fázového přechodu začíná kritickým bodem, který bude možno zkoumat při kolizích o těžištvé energii $\sqrt{s_{NN}} \approx 7 \text{ GeV}$. Oblast vysokých baryochemických potenciálů má velmi bohatou fázovou strukturu, je však experimentálně nedosažitelná. Předpokládá se, že v této oblasti se může nacházet jaderná hmota v centru kvarkových hvězd [6]. (obrázek převzat z [5])

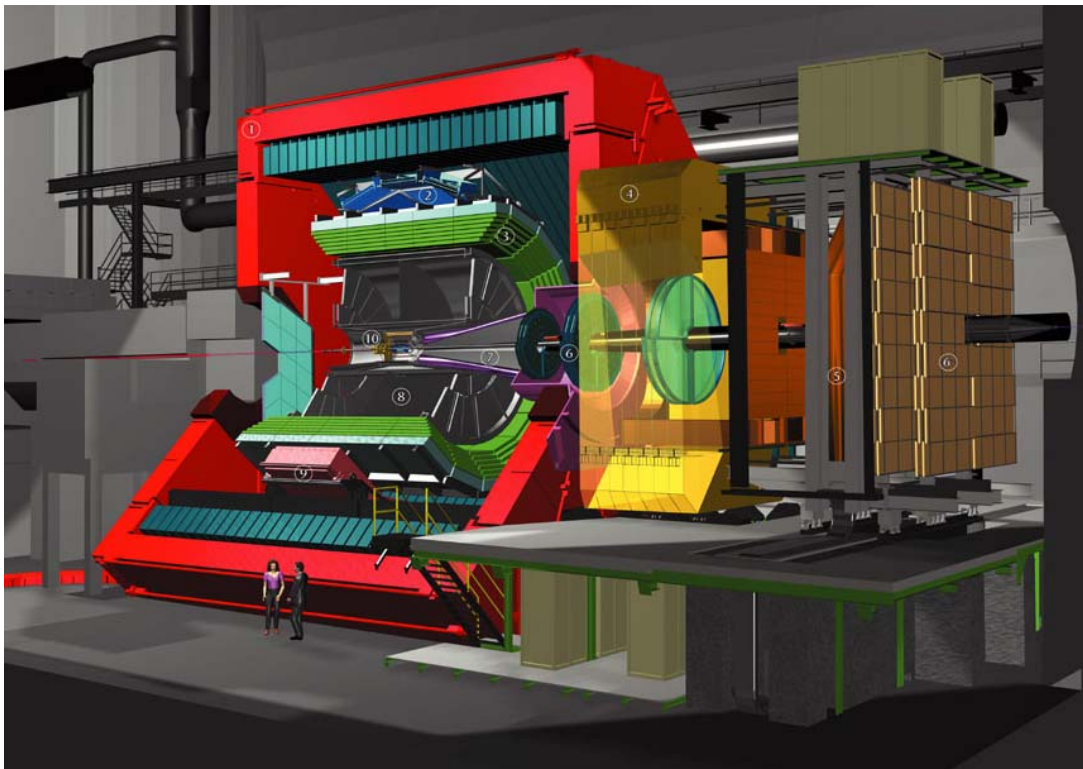
3 Konstrukce detektoru ALICE

ALICE (A Large Ion Collider Experiment) [20] * je experiment budovaný na urychlovači LHC. Tento experiment je navržen tak, aby mohl studovat jaderné srážky při těžištvých energiích až 5.5 TeV na nukleon. Hlavním cílem experimentu je detailní studium vlastností jaderné hmoty při vysokých teplotách a hustotách s ohledem na studium znovuustanovení chirální symetrie a osvobození kvarků (deconfinement). Schéma detektoru je uvedeno na obrázku 3.1.

Základním problémem při konstrukci detektoru bylo množství částic vznikajících při jaderné srážce. Pro návrh byla uvažována produkce až 8000 nabitých částic na jednotku rapidity v centrální oblasti při $Pb - Pb$ srážce. Tím je určena nutná granularita detektorů i jejich vzdálenosti od interakčního bodu. Poslední extrapolace četnosti produkovaných částic vycházející z měření na urychlovači RHIC ukazují však na to, že produkce částic nebude tak vysoká.

3.1 Centrální detektor

Centrální část má plné azimutální pokrytí a pokrývá pseudorapidity interval $-0.9 < \eta < 0.9$. Pro měření hybnosti jsou detektory centrální části umístěny v solenoidním magnetu, který bude pracovat s indukci $B = 0.4 \text{ T}$



Obrázek 3.1: Experiment ALICE na urychlovači LHC. 1) solenoidní magnet, 2) identifikace částic s vysokou hybností HMPID, 3) detektor doby letu TOF a detektor přechodového záření TRD, 4) dipólový magnet mionového spektrometru, 5) mionový filtr, 6) dráhové komory mionového spektrometru, 6') spouštěcí komory mionového spektrometru, 7) absorbér mionového ramena, 8) časově projekční komora TPC, 9) fotonový spektrometr PHOS a 10) vnitřní dráhový detektor ITS. (obr. kolaborace ALICE)

Nejblíže interakčnímu bodu se nacházejí dvě vrstvy křemíkových pixelových detektorů (SPD), následují dvě vrstvy křemíkových driftových detektorů (SDD) a dvě vrstvy křemíkových stripových detektorů (SSD). Tyto detektory spolu tvoří vnitřní dráhový systém (ITS), jehož hlavním úkolem je rekonstrukce interakčního vrcholu, sekundárních rozpadových vrcholů D mezonů a hyperonů, identifikace a měření hybnosti částic s malými příčnými hybnostmi a zlepšení úhlového a hybnostního rozlišení časově projekční komory TPC.

ITS je obklopen časově projekční komorou TPC rekonstruující dráhy a specifické energetické ztráty prolétávajících nabitých částic. Dalším detektorem je detektor přechodového záření TRD, sloužící k identifikaci elektronů a měření hybnosti elektronů s velkou příčnou hybností. Tento detektor je též schopen rozpoznat e^+e^- páry pocházející ze vzácných rozpadů J/Ψ a Υ a proto může sloužit ke spouštění ostatních detektorů (jako trigger). Detektor TRD je obklopen detektorem doby letu částic TOF. Kombinací z detektorů TOF a TPC jsou identifikovány nabitě částice o středních příčných hybnostech. V budoucnu bude přidán ještě elektromagnetický kalorimetr.

Kromě zmíněných detektorů s plným azimutálním pokrytím je v centrální oblasti umístěn ještě detektor identifikující částice s velkými příčnými hybnostmi HMPID, fotonový spektrometr PHOS, detektor multiplicity fotonů PMD a detektory sloužící ke stanovení okamžiku srážky (T0), určení centrality srážky (V0) a ke studiu četnosti nabitých částic v oblasti $-3.4 < \eta < -0.9$ $0.9 < \eta < 5.0$ (FMD).

Vnitřní dráhový detektor je schopen rekonstruovat pozici primárního interakčního vrcholu s přesností $5\mu\text{m}$ ve směru svazku a $25\mu\text{m}$ v příčné rovině. V případě $p-p$ srážek je díky nízké četnosti produkco-

vaných nabitých částic přesnost rekonstrukce primárního vrcholu přibližně o řád nižší. Díky nízkým četnostem částic však toto zhoršení nemá vliv na rekonstrukci fyzikálních signálů, jako rozpadů D^0 nebo K_S^0 .

Rekonstrukce drah nabitých částic je v TPC možná od příčné hybnosti $p_T \approx 0.2 \text{ GeV}/c$. Při nižších příčných hybnostech se spirální dráha stáčí zpět do ITS. S využitím specifické rekonstrukce nízkohybnostních drah lze rekonstruovat dráhy od $p_T \approx 0.1 \text{ GeV}/c$. Při kombinované rekonstrukci drah v TPC a ITS je dosaženo hybnostního rozlišení 3.5% pro $p_T = 100 \text{ GeV}/c$ a $B = 0.5 \text{ T}$. TPC dosahuje při měření energetických ztrát dE/dx přesnosti 6%, při nízkých příčných hybnostech je její rozlišení 0.7% při $p_T = 1 \text{ GeV}/c$ a $B = 0.5 \text{ T}$.

3.2 Mionový spektrometr

Mionový spektrometr se skládá z předního absorberu zachycujícího co největší množství hadronů a fotonů vlétajících do spektrometru. Částice, které projdou absorberem prolétají 10 rovinami dráhového systému s vysokou granularitou. Jejich hybnost je měřena dipólovým magnetem s integrovanou indukcí 3 Tm . Následuje další absorber - mionový filtr, za nímž se nacházejí spoštěcí (triggerových) komor. Oblast kolem trubice svazku procházející středem spektrometru musí být stíněna, aby detektory netrpěly dopadem částic produkovaných na vysokých rapiditách a jejich rozpadových produktů. Spektrometr pracuje s miony od hybnosti $4 \text{ GeV}/c$ a v úhlovém rozsahu $2 - 9^\circ$.

Kvalita rekonstrukce závisí kriticky na pozadí. Nicméně i v případě simulovaných pesimistických scénářů je hmotové rozlišení v oblasti hmoty $M_\Upsilon = 9.46 \text{ GeV}/c^2$ lepší, než $0.1 \text{ GeV}/c^2$.

3.3 Sběr dat a výběr událostí

Důležitou součástí experimentu je rovněž sběr a selekce dat. Problematika zahrnující sběr dat (DAQ), trigger a trigger vysoké úrovně (HLT) je popsána v publikaci [24]*.

Kvalitní selekce událostí umožňuje optimální využití rychlosti detektorů a možností pro ukládání dat. Četnost vyčítaných událostí je redukována výběrem pomocí spouštěče (triggeru), celkový objem dat je pak redukován jednak jejich kompresí, jednak jejich výběrem během předzpracování v triggeru vysoké úrovně. Pro toto průběžné zpracování a třídění dat bude využita výpočetní farma s cca 1000 CPU.

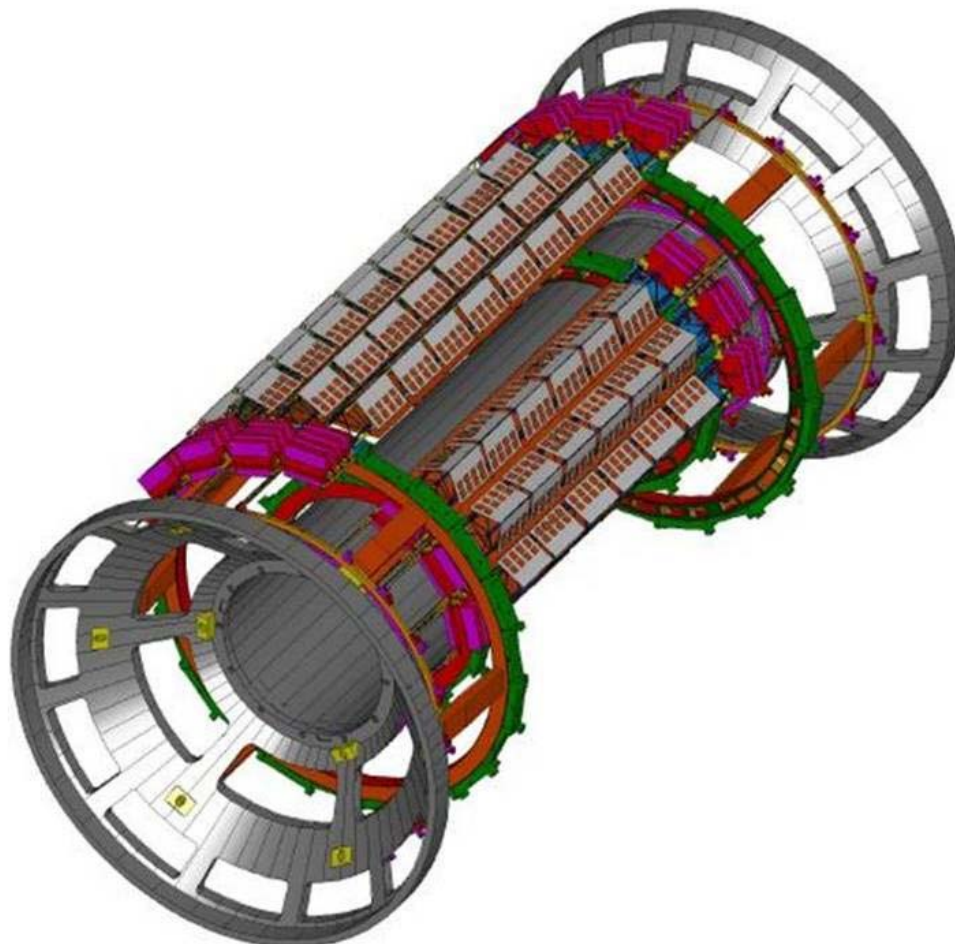
3.4 Identifikace neutrálních částic

Spektrometr PHOS detekuje fotony až do energie $\approx 100 \text{ GeV}/c$ s vysokým energetickým a prostorovým rozlišením. Spektrum přímých fotonů se získává po odečtení fotonů pocházejících z rozpadů π^0 , η , ω a dalších neutrálních mezonů. Detektor četnosti fotonů (PMD) registruje fotony v oblasti pseudorapidit $2.3 - \eta - 3.5$, přičemž čistota vzorku rekonstruovaných fotonů je lepší než 60%.

3.5 Konstrukce vnitřního dráhového systému

Zavěrem se věnujme podrobněji popisu vnitřního dráhového systému ITS, důležitého z hlediska fyzikálních aktivit, na kterých se autor podílí. Jak již bylo zmíněno, sestává ITS [23]* * ze šesti vrstev detektorů. Dvě vnitřní vrstvy sestávající z pixelových detektorů budou připevněny přímo k beryliové vakuové trubici, kterou prolétají svazky LHC. Mechanické řešení dalších vrstev je naznačeno na obrázku 3.2. Na dvou odlehčených kuželových nosnících z uhlíkových vláken jsou připevněny nosníky detektorů (laddery), které v případě vnitřní SDD vrstvy nesou vždy 6 lineárních SDD, ve druhé vrstvě vždy 8 SDD. Jednotlivé detektory opatřené vyčítací elektronikou jsou chlazeny vodou protékající konstrukcí ladderu.

Na koncích ladderu jsou umístěny napájecí desky pro každý z detektorů a deska koncentrátoru dat a optického spoje. Vzhledem k přesnosti SDD je celá mechanická sestava velice přesně vyrobena a justována. Obdobným způsobem jsou namontovány i vnější SSD vrstvy. Celá konstrukce je provedena z uhlíkových vláken a lehkých materiálů, aby byla minimalizována produkce sekundárních částic v materiálu ITS.

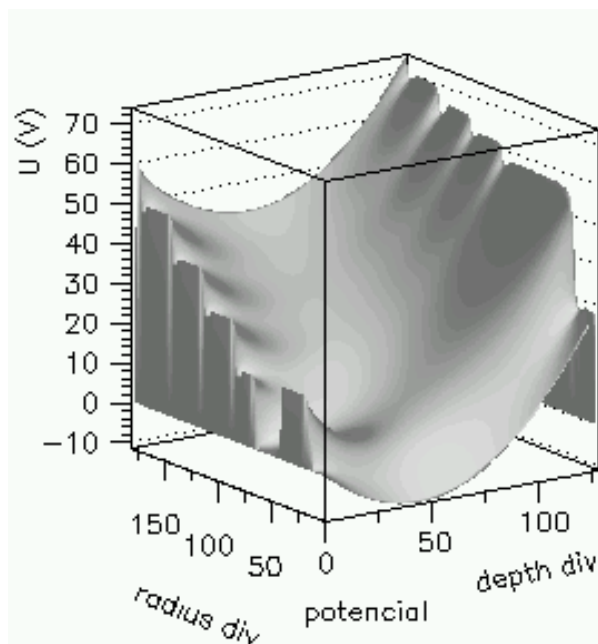


Obrázek 3.2: Vnitřní dráhový systém (ITS) detektoru ALICE. Nosná struktura se znázorněnými částečně namontovanými vrstvami křemíkových driftových detektorů. Tyto vrstvy budou obklopeny dvěma vrstvami křemíkových stripových detektorů. K vakuové trubici procházející středem ITS budou připevněny dvě vrstvy křemíkových pixelových detektorů. (obr. kolaborace ALICE ITS)

3.6 Křemíkové driftové detektory ITS

Princip křemíkového driftového detektoru (SDD) byl navržen Pavlem Rehakem a Emiliem Gattim v roce 1984 [11]. SDD je vyroben dvoustrannou technologií na křemíkové desce (obvykle typu N) o vysokém měrném odporu ($\approx 3.5k\Omega.cm$), obvykle připravené pomocí neutronového transmutačního dotování. Na obou površích křemíkové desky jsou implantovány série P oblastí vytvářející $P-N$ přechody. Tyto oblasti jsou navzájem spojeny implantovanými P rezistory, které utvářejí vnitřní napěťový dělič. Na povrchu P oblastí a v mezerách mezi nimi je detektor pokryt tenkou vrstvou SiO_2 . Ta slouží jednak jako ochrana povrchu, jednak jako hradlová vrstva pro MOS injektory náboje, které slouží k monitorování rychlosti driftu elektronů. Oxidová vrstva je překryta tzv. polními deskami, vrstvami Al metalizace spojené s P

oblastí a přesahujícími hranice $P-N$ přechodů. Tyto vrstvy brání průrazu $P-N$ přechodu při velkém rozdílu napětí mezi sousedními $P-N$ přechody a tak umožňují použití vyšších driftových polí. Na okraji desky jsou pak umístěny anody (oblasti typu $N+$) na nichž se sbírá náboj z detektoru. Jednotlivé anody jsou odděleny separační P elektrodou znemožňující jejich vzájemné galvanické propojení. V důsledku toho mají anody velmi malou kapacitu, řádově 400fF , která vnáší malý šum do vstupu připojeného předzesilovače. Na obvodu je detektor doplněn ochrannou anodou sbírající povrchové a podpovrchové zbytkové proudy a v některých případech též ochrannými zónami pro bezpečnou degradaci vysokého napětí.



Obrázek 3.3: Rozložení potenciálu v objemu křemíkového driftového detektoru. Ve směru x dle k odpovídá $2.26\mu\text{m}$, ve směru y (ve směru označeném též radius) pak $4.75\mu\text{m}$

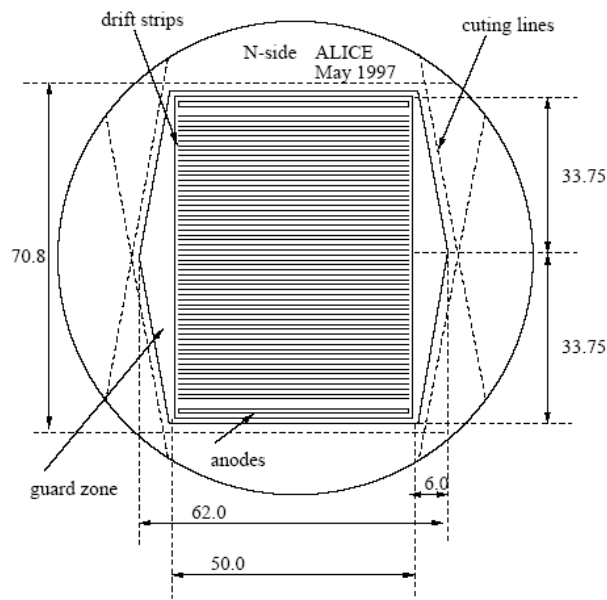
Pokud na takovouto strukturu přivedeme vysoké napětí, dojde k úplnému ochuzení celého objemu křemíkové desky, kdy nejsou přítomny volné nosiče náboje, a díky implantovanému (nebo vnějšímu) děliči napětí se ustaví spád napětí, v jehož směru budou driftovat elektrony. Na obrázku 3.3 je znázorněn průběh potenciálu v objemu detektoru poblíže anod. Přes diskretní průběh potenciálu na povrchu je patrné, že ve středu desky je spád potenciálu hladký. S dobrým přiblížením lze tedy docílit konstantního driftového pole ve směru y (viz. obrázek 3.3). Parabolický průběh potenciálu ve směru tloušťky desky zabezpečuje rychlé shluknutí elektronů vytvořených průletem nabitě částice v oblasti středu její tloušťky.

Při průletu minimálně ionizující relativistické částice detektorem se uvolní průměrně 25000 elektron - děrových párů. Vzniklé díry se pohybují k nejbližším $P-N$ přechodům, zatímco elektrony se během několika ns shluknou v polovině tloušťky detektoru a vydají se směrem k anodám. Dynamika elektronů je popsána v základní práci [12]. Na vzniklý elektronový oblak působí jak difúze, tak i vnitřní repulse. V důsledku toho se tvar pulzu mění. To při rekonstrukci nehraje podstatnou roli, pokud pracujeme pouze s těžištěm nábojového rozdělení a pokud šum systému není příliš velký. V případě vysokého šumu jsme nuceni zvýšit práh detekce signálu a pod ním ztrácíme více z náboje pulzů s dlouhým driftem.

Driftová rychlost v křemíku je úměrná přiloženému elektrickému poli $v_{dr} = \mu E$, kde pohyblivost je úměrná teplotě jako $\mu \approx T^{-2.42}$ [19]. Proto je nutno k udržení konstantní driftové rychlosti (potřebné k přesné poziční rekonstrukci) udržovat velmi přesně stálou teplotu, nebo monitorovat průběžně driftovou rychlost pomocí injekcí náboje v pevném místě detektoru a měřením doby jeho driftu. Metodika injekce náboje pomocí MOS injektorů je popsána v práci [14]. Chování SDD v magnetickém poli popisuje [15].

V případě vysoké hustoty částic je třeba uvážit též problematiku dvoučásticového rozlišení detektoru. Ta je diskutována v pracích [13] a [8].

V současné době probíhá oživování systému dvou rovin lineárních SDD v experimentu ALICE [17], na kterém se autor podílí. Jako ilustraci struktury lineárních SDD uveďme geometrii prototypu SDD ALICE o aktivní ploše 33.5cm^2 [10] **, vyvinutého autorem. Celkový pohled na tento detektor je uveden na obrázku 3.4.

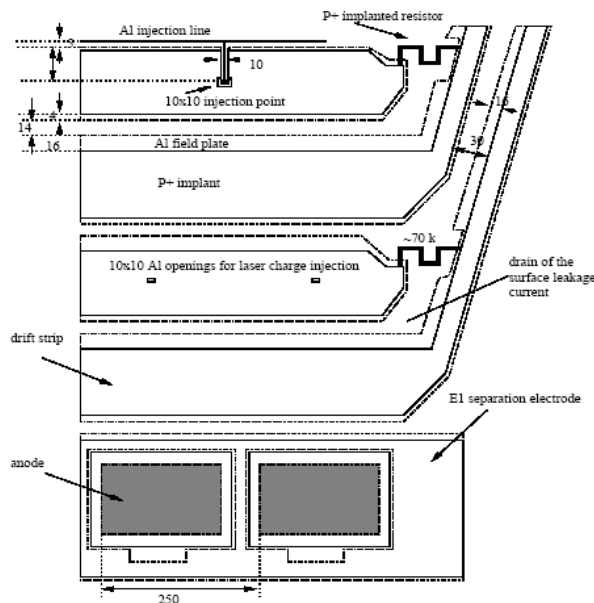


Obrázek 3.4: Celkový pohled na návrh prototypu lineárního driftového detektoru pro experiment ALICE vyrobeného na 4" křemíkové desce. Rozměry jsou uvedeny v milimetrech.

Detektor byl vyroben na 4" křemíkové $NTD\ 3.5\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$ desce o tloušťce $250\ \mu\text{m}$. Pro návrh byla zvolena hexagonální geometrie, která dovoluje vytvořit obdélníkovou citlivou oblast $50\text{mm} \times 67.5\text{mm}$. Ta je rozdělena na dvě stejně velké poloviny. Ve středu je přiloženo vysoké napětí a drift probíhá směrem k anodám umístěným na okrajích detektoru. Detektor je vybaven 200 anodami s rozstupem $250\ \mu\text{m}$. Po stranách citlivé oblasti jsou umístěny ochranné zóny, ve kterých postupně klesá potenciál přivedený na driftové $P-N$ přechody tak, aby nedošlo k jejich průrazu. Ochranná oblast je tvořena P implantací spojenou s metalizací. Mrtvá plocha detektoru činí 9%. V detektorovém systému se pak sousední detektory překrývají, čímž je mrtvá plocha odstraněna.

Na obrázku 3.5 lze demonstrovat některé detaily konstrukce detektoru. Specifická konstrukce byla zvolena pro injektory náboje, které - na rozdíl od konečné verze detektorů [17] - využívají přímou injekci pomocí $N+$ implantů. Implementovány jsou ovšem i standardní MOS injektory. Pro přesnou injekci náboje infračerveným laserem byla v metalizaci otevřena okénka $10 \times 10\ \mu\text{m}$, takže i hůře fokusovaný paprsek injektuje náboj jen v této malé oblasti. Patrný jsou rovněž meandry odporů implantovaného děliče napětí. Tvar oblasti přechodu mezi driftovým proužkem a ochrannou zónou je navržen tak, že elektrony vznikající pod povrchem oxidové vrstvy jsou odváděny do ochranné zóny a nepřispívají k šumu anod. Naznačeny jsou rovněž již zmíněné ochranné pruhy metalizace umožňující detektoru pracovat s polem až $76\ \text{V}/\text{mm}$.

Výroba detektoru vyžadovala použití oboustranné technologie. Nejmenší přípustné detaily na maskách mohly být $1\ \mu\text{m}$ velké. Detektor byl navržen v programu CADENCE, masky vygenerovány na optickém generátoru masek a detektory byly vyrobeny ve firmách ICM Praha a TESLA SEZAM. Detektory byly vyřiznuty z křemíkových desek laserem nebo diamantovou pilou a posléze namontovány do držáků, kde k nim byla připojena vyčítací elektronika. Jeden z vyrobených detektorů byl otestován na vývodu H4

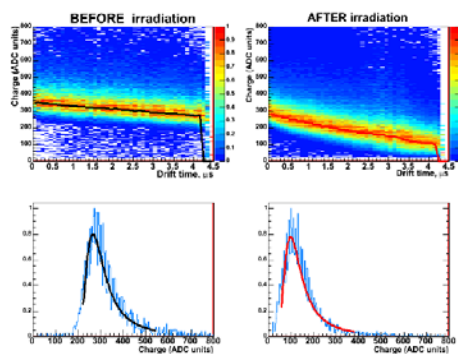


Obrázek 3.5: Detail struktury prototypu lineárního driftového detektoru pro experiment ALICE. Rozměry jsou uvedeny v mikrometrech.

urychlovače SPS pomocí svazku $348\text{GeV}/c \pi^-$.

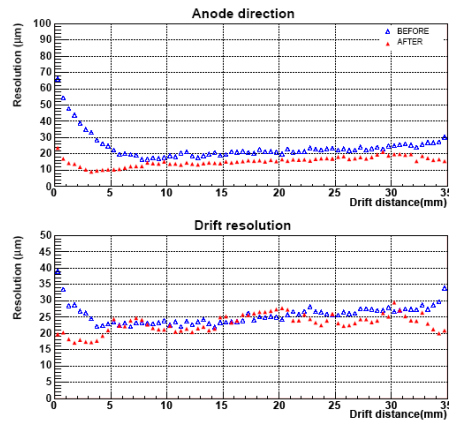
Výsledky této práce byly prezentovány jako poster na konferenci Quark Matter 99 v Turíně a v interní zprávě experimentu ALICE [10] * *.

Po návratu z pobytu na universitě v Heidelbergu na konci roku 2003 autor dále pokračuje ve spolupráci na vývoji a testech lineárních SDD vyráběných firmou Canberra a navržených v INFN Terst. V rámci skupiny SDD byla české straně přidělena odpovědnost za vývoj nízkonapětového napájecího systému SDD a za řídicí systém detektoru SDD. Autor je vedoucím týmu ITS SDDČR a z tohoto titulu odpovídá za splnění našich závazků v této oblasti. Autor rovněž vede experimentální skupinu ALICE na FJFI, jež je kolaborací ALICE pověřena zajištěním řídicího systému SDD. Na této činnosti se v současné době podílí 6 osob. Tento úkol bude dokončen v první polovině roku 2007.



Obrázek 3.6: Závislost rekonstruovaného náboje na délce driftu u lineárního SDD před a po ozáření dávkou ekvivalentní poškození detektoru po 20 letech provozu experimentu ALICE.(obr. [16])

Pro optimální využití přesnosti poziční rekonstrukce SDD je třeba se věnovat studiu vlastností a defektů lineárních SDD. Autor se podílel na studiu vlivu radiačního poškození SDD na jeho činnost



Obrázek 3.7: Odchyly rekonstruované pozice průletu částice od skutečné polohy způsobené nehomogenitou v koncentraci donorů v materiálu detektoru u lineárního SDD před a po ozáření dávkou ekvivalentní poškození detektoru po 20 letech provozu experimentu ALICE.(obr. [16])

[16] * *. Na obrázku 3.6 je uvedena závislost náboje vytvořeného průletem nabitě částice rekonstruovaného detektorem na délce driftu pro detektor před a po radiačním poškození. Ač zjevně dochází ke ztrátám náboje na poruchách materiálu polovodiče vzniklých radiačním poškozením, detektor je stále schopen činnosti. Jak ukazuje obrázek 3.7, nedochází k významnému zhoršení prostorového rozlišení detektoru. Z výsledků analýzy tedy vyplývá, že SDD i po ozáření ekvivalentem dávky, kterou by obdržel za 20 let provozu, bude schopen provozu v rámci specifikací. Během testů na svazku byl rovněž zkoumán injektorový systém sloužící k monitorování driftové rychlosti [18].

Křemíkové driftové detektory v sobě spojují schopnost dosáhnout velmi vysoké přesnosti rekonstrukce místa průletu částice, schopnost detekce velkého množství částic a schopnost měření energetických ztrát částice při průletu detektorem. Jejich nevýhodou, vyplývající z využití elektronového driftu na vzdálenost několika centimetrů, tedy je, že detektory nejsou při sběru signálu tak rychlé, jako například křemíkové pixelové detektory. K vyčtení signálu z SDD je typicky třeba doba $5\mu s$. V případě experimentu ALICE to však není limitující faktor, díky tomu, že je vybaven mnohem pomalejším detektorem TPC, který potřebuje k vyčtení přibližně desetinásobnou dobu. Spolu s dalšími detektorovými vrstvami ITS budou SDD schopny, kromě rekonstrukce interakčních a sekundárních vrcholů a rekonstrukce dráhových segmentů nabitých částic, pomocí energetických ztrát a tvaru dráhy, která neopustí objem ITS, identifikovat částice s malými příčnými impulzy. Činnost tak velkého detektorového systému je velkou výzvou a tak nezbyvá, než s napětím vyčkat konce roku 2007, kdy začneme získávat první data.

4 Fyzikální program experimentu ALICE

Experiment ALICE se bude snažit o komplexní zkoumání jaderné srážky. Podrobný rozbor fyzikálního programu experimentu přesahuje rámec této přednášky. Detailně je tato problematika popsána ve dvousvazkovém dokumentu ALICE Physics Performance Review [21]*, [22]*. Zde nastiňme motivaci experimentu, přehled hlavních oblastí, ve kterých bude studium probíhat, a to s vyznačením oblastí, v nichž je autor zapojen.

4.1 Motivace experimentu ALICE

Při jaderné srážce při vysoké energii, jejíž dynamika byla popsána v kapitole 2, můžeme vytvořit hmotu v extrémně horké a komprimované formě. Předpokládáme, že hmota podobných vlastností existovala ve Vesmíru v několika mikrosekundách jeho věku. Na rozdíl od tohoto případu jsme však schopni vytvořit obdobné podmínky pouze v oblasti překryvu dvou srážejících se jader. Tato "konečnost" srážkového systému má důležité důsledky pro procesy v něm probíhající. Zejména patrné jsou rozdíly a změny ve fázové struktuře, zejména u přechodu mezi dekonfinovanou a hadronovou fází. Charakteristiky tohoto přechodu a vlastnosti hmoty v dekonfinované fázi patří mezi základní problémy, na které budeme hledat odpověď. Abychom mohli studovat vlastnosti hmoty v dekonfinované fázi, musíme dobře porozumět všem fázím jaderné srážky. Počínaje počátečními fázemi, které připravují podmínky pro vznik dekonfinované rovnovážné fáze, přes její vývoj - expanzi a chladnutí, až po její rozpad do hadronů a posléze do okamžiku, kdy vzniklé hadrony ztrácejí vzájemný kontakt. Vývoj dekonfinované fáze a husté hadronové fáze můžeme modelovat pomocí relativistické hydrodynamiky. V tomto modelu vystupují stavové rovnice jednotlivých fází, které se rovněž budeme snažit přesněji určit.

Díky procesu hadronizace a díky intenzivnímu přerозptylu dochází bohužel k rozmytí a ztrátě informace o dekonfinované fázi. Proto musíme pečlivě volit pozorovatelné veličiny, které jednak vznikají v relevantních fázích srážky a jsou co nejméně ovlivněny těmito procesy. Proto budeme zkoumat elektromagnetické sondy - fotony pocházející z primárních srážek a z tepelného záření dekonfinované fáze a dileptonové páry pocházející z rozpadů těžkých rezonancí, zejména kvarkonií.

Částice obsahující těžké kvarky (c,b) produkované v primárních nukleon-nukleonových srážkách jsou rovněž vhodnou sondou a to díky svému časnému vzniku a malému ovlivnění lehkými kvarky.

Produkce jetů, zkoumání jejich energetických ztrát při průletu dekonfinovanou hmotou a zkoumání kolektivní odezvy tohoto média na průlet jetu, představují další oblast budoucího výzkumu s velkým potenciálem pro stanovení vlastností dekonfinované hmoty.

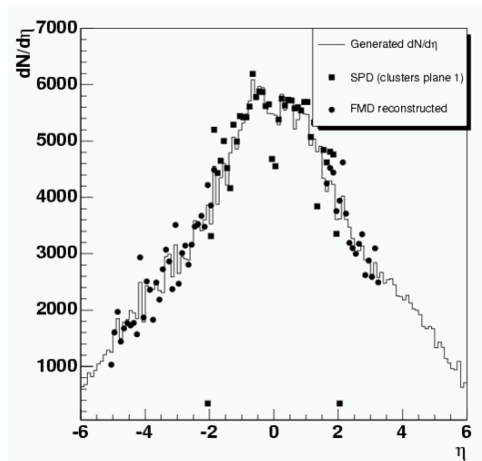
Pouze kombinací několika zkoumaných veličin a pomocí detailního teoretického modelování bude možno jednoznačně popsat a pochopit chování tak složitého systému, jako jsou dvě srážená jádra. V následujících odstavcích uvedme přehled hlavních pozorovaných veličin s uvedením těch částí detektorů, které budou rozhodující při jejich měření.

Pro kvantitativní popis procesů pozorovaných při jaderných srážkách je třeba srovnání s patřičně přeškálovanými měřeními obdobných veličin získanými při srážkách protonů. Proto se experiment bude věnovat rovněž proton-protonovým srážkám.

4.2 Geometrie srážky

Abychom byli schopni zjistit prostorovou oblast, kde ke srážce došlo a jak velké části jader se srazily, musíme zjistit její geometrii. Geometrii srážky lze charakterizovat pomocí globálních proměnných, které ukazují, jak se těžištvá energie srážky přerozděluje ve fázovém prostoru. Geometrii srážky lze určit dvěma způsoby: i) pomocí kalorimetru pod nulovým úhlem ZDC, který je schopen zjistit počet

nukleonů, které vstoupily do reakce. ii) pomocí multiplicity nabitých částic, kterou můžeme kombinací detektorů FMD a ITS měřit v rozsahu 8 jednotek v η . Z hlediska našeho zkoumání dělíme srážky na centrální, s téměř kruhovou symetrií srážkové oblasti, a na srážky periferní, při kterých vzniká čočkovitá srážková oblast. V centrálních srážkách je dosahováno největších rozměrů srážkové oblasti a vzniklý systém setrvá nejdéle v dekonfinované fázi. U periferních srážek můžeme s výhodou zkoumat vývoj excentricity a s ní související azimutální asymetrie v hybnostech produkovaných částic. Právě z intenzity tohoto kolektivního pohybu můžeme vyvodit řadu závěrů o charakteru dekonfinované fáze.



Obrázek 4.1: Produkce nabitých částic při srážkách Pb-Pb při $\sqrt{s} = 5.5 \text{ GeV}$ (simulace). (obrázek převzat z [22])

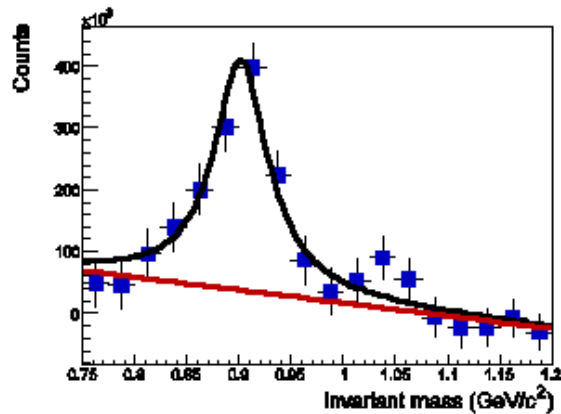
4.3 Produkce částic

Studium produkce částic, poměrů jejich četností a jejich hybnostních spekter je důležité z hlediska pochopení chemických a tepelných podmínek ve fázi vzniku částic z dekonfinovaného média. Budeme studovat i procesy nadbytečné produkce částic při srovnání se superpozicí nukleon-nukleonových srážek. Zvýšená produkce zejména podivných částic je přičítána právě osvobození kvarků. V centrální oblasti bude studována rovněž produkce baryonů s ohledem na mechanismus transportu baryonového čísla v rapiditě.

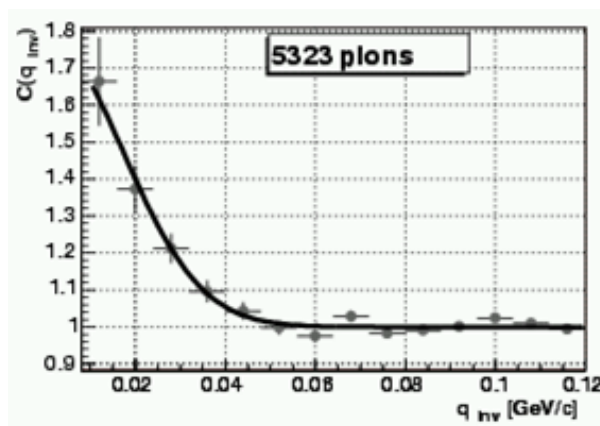
V oblasti vyšších příčných impulzů budou hrát důležitou roli kolektivní toky částic a tvrdé procesy. Toto měření bude prováděno zejména pomocí ITS, TPC, TRD a TOF a rovněž HMPID. Dostatečně stabilní nabitě hadrony (π, K, p) mohou být rekonstruovány od nízkých příčných hybností $\approx 300 \text{ MeV}/c$ až do $\approx 50 \text{ GeV}/c$. Pro identifikaci hyperonů a K^0 jsou využity identifikované sekundární vrcholy.

4.4 Několikačasticové korelace

Tvar a rozměry oblasti emitující částice mohou být určeny ze studia dvoučasticových korelací metodou dvoučasticové intenzitní interferometrie identických a neidentických částic. V případě emise z granulózní emisní oblasti bude tato metoda kombinována s hledáním oblastí, do nichž jednotlivé granule vyzářily částice. Korelační měření budou pak prováděna na souborech částic odpovídajících jednotlivým granulám. ALICE bude provádět rovněž analýzy korelací přímých fotonů. Studium korelací různých identifikovaných částic můžeme studovat lépe porozumět procesu emise částic a rovněž geometrii a vývoji kolizní oblasti. Toto měření bude prováděno zejména pomocí ITS a TPC.



Obrázek 4.2: Produkce K při srážkách Pb-Pb při $\sqrt{s} = 5.5 \text{ GeV}$ (simulace). (obrázek převzat z [22])



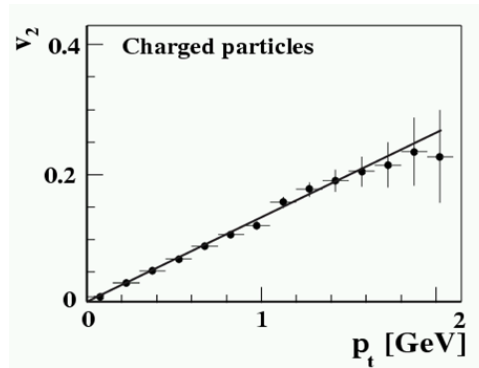
Obrázek 4.3: Dvoučásticové korelace π při srážkách Pb-Pb při $\sqrt{s} = 5.5 \text{ GeV}$ měřené v jednotlivých událostech (simulace). (obrázek převzat z [22])

4.5 Kolektivní toky částic

Měření anizotropního toku částic je velice důležité pro pochopení dynamiky jaderné srážky, zejména pak hydrodynamické evoluce QGP, kdy se větší část anizotropického toku vyvíjí. Určení srážkové roviny v centrálním detektoru je možné provést nezávisle v různých subsystémech. S výhodou pak bude možno výsledky srovnat. V rapiditách blízkých svazku může být reakční rovina určena pomocí ZDC.

4.6 Fyzika v jednotlivých událostech

Studium fluktuací pozorovaných termodynamických veličin může odhalit vlastnosti fázového přechodu QGP. Měření různých veličin, jako například $\langle P_T \rangle$, četnosti nebo produkce podivnosti v individuálních událostech (event-by-event) umožní studium vlastností média a rovněž částic s vysokými příčnými hybnostmi a jetů. Bude rovněž provedeno hledání disorientovaného chirálního kondenzátu - hypotetických oblastí, kde došlo ke znovuustavení chirální symetrie, rozpadajících se specifickým způsobem na π mezony. Na studiu těchto problémů se autor rovněž podílí.

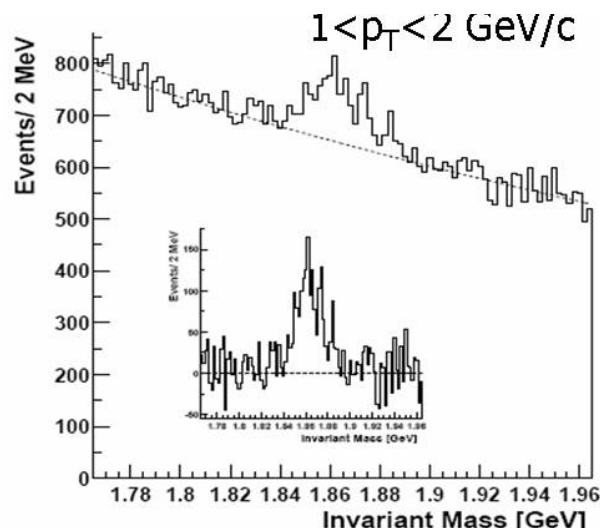


Obrázek 4.4: Závislost intenzity eliptického toku na příčném impulzu při srážkách Pb-Pb při $\sqrt{s} = 5.5\text{GeV}$ (simulace). (obrázek převzat z [22])

4.7 Produkce těžkých kvarků

Při energiích $5.5\text{TeV}/A$ se bude vytvářet již významné množství c a b , tedy těžkých kvarků. Experiment ALICE bude schopen sledovat částice obsahující tuto kvarky, zejména $D^0, D^{+/-}$ a $D_s^{+/-}$, i v oblasti nízkých hybností pomocí jejich hadronových rozpadů. Proto bude možné otestovat předpovědi QCD týkající se energetických ztrát těžkých kvarků v dekonfinovaném prostředí a srovnat je s energetickými ztrátami lehkých partonů (lehkých kvarků a gluonů). Produkce b kvarků může být studována pomocí semi - leptonických rozpadů.

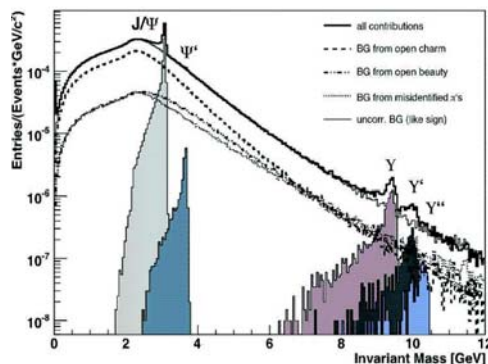
V oblasti hadronových rozpadů půvabných mezonů pracuje i autor. Podílí se na vývoji metod rekonstrukce nabitých $D^{+/-}$ a $D_s^{+/-}$ mezonů v rámci pracovní skupiny těžkých kvarků.



Obrázek 4.5: Produkce D^0 při srážkách Pb-Pb při $\sqrt{s} = 5.5\text{GeV}$ rekonstruovaná v $D^0 \rightarrow K\pi$ kanálu (simulace). (obrázek převzat z [22])

4.8 Kvarkonia

Studium produkce kvarkonií (J/Ψ , Ψ' a dalších stavů) umožní hlubší pochopení mechanismu jejich rozpuštění v dekonfinovaném médiu a jejich případného opětovného vytvoření při hadronizaci. ALICE opět umožňuje měření kvarkonií téměř od nulové příčné hybnosti.



Obrázek 4.6: Produkce kvarkonií při srážkách Pb-Pb při $\sqrt{s} = 5.5 \text{ GeV}$ rekonstruovaná v $e - e$ kanálu (simulace). (obrázek převzat z [22])

4.9 Produkce fotonů

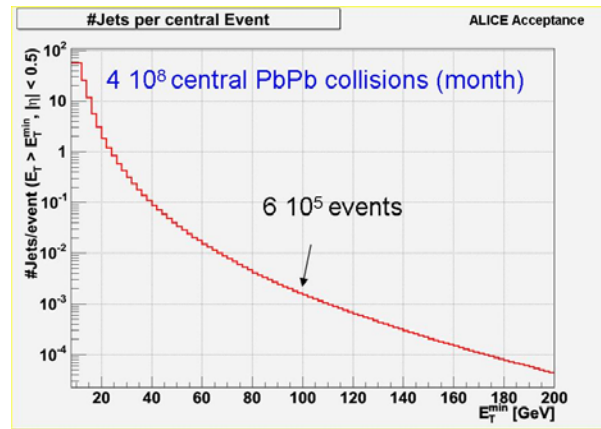
Produkce promptních fotonů o vysokých příčných hybnostech umožní studium tvrdých procesů v hustém a horkém prostředí bez následného rozptyl produktů v koncovém stavu. Tepelné fotony v oblasti nízkých příčných hybností přinášejí informaci o vývoji teploty kolizní oblasti v počátečních fázích srážky. Měření fotonů bude prováděno detektorem PHOS nebo alternativně pomocí studia konverzí fotonů na $e^+ - e^-$ páry, které budou registrovány v ITS a PHOS.

4.10 Energetické ztráty partonů v dekonfinované hmotě

Velmi účinným postupem při studiu vlastností dekonfinovaného média se ukázalo být studium energetických ztrát rychlých partonů v něm se pohybujících (jet quenching). Na vlastnosti média je nejcitlivější měření podélných a příčných fragmentačních funkcí jetu v oblasti velkých a malých relativních hybnostních frakcí z . Bohužel detekce jetu v prostředí jaderné stážky je komplikována přítomností velkého pozadí. Proto je třeba aplikovat speciální metodiky rekonstrukce jetu a použít rovněž prahovou hybnost částic využívaných při rekonstrukci na $p_t \approx 1 - 2 \text{ GeV}/c$

4.11 Ultraperiferální jaderné srážky

Studium ultraperiferálních srážek, při nichž dochází k produkci částic indukované fotony emitovanými prolétajícími jádry, vyžaduje modifikaci triggeru experimentu. Fotony mohou s partony v terčovém jádru interagovat například pomocí foton - gluonové fúze za vzniku jetů a párů těžkých kvarků. Simulace ukazují, že produkce párů těžkých kvarků a těžkých vektorových mezonů (J/Ψ) bude dostatečná k provedení měření.



Obrázek 4.7: Produkce jetů při srážkách Pb-Pb při $\sqrt{s} = 5.5 \text{ GeV}$ (simulace). (obrázek převzat z [22])

4.12 Fyzika kosmického záření

Težišťové energie, které budou k dispozici na LHC odpovídají energiím protonů ($E \approx 10^{17} \text{ eV}$) dopadajících na pevný terčik. Tak se poprvé otevírá možnost zkoumat oblast za zlomem (knee) ve spektru kosmického záření, který leží na energii ($E \approx 3 \times 10^{15} \text{ eV}$). Detektor bude rovněž schopen registrovat skutečné spršky kosmického záření, zejména mionů, pocházející z interakcí vysokoenergetických částic z kosmického prostoru s atmosférou.

4.13 Další problémy, jež budou studovány

Experiment ALICE bude pracovat s energií $27 \times$ větší, než byla energie dostupná na urychlovači RHIC. Kromě zmíněných oblastí bude rovněž možno pozorovat intermediální bosony W/Z . Experiment bude zkoumat rovněž oblast malých frakčních momentů až do $x \sim 10^{-6}$. Vysoká počáteční hustota energie přivede systém hlouběji do dekonfinované oblasti. Výsledky budou rovněž lépe interpretovatelné poruchovou QCD a pomocí výpočtů QCD na mříži. Neméně zajímavou oblastí je studium počátečních fází kolize, při kterých dochází k intenzivnímu zbrzdění interagujících jader, přičemž by mohlo docházet například k vyzařování Unruhova záření neinerčální soustavou jader nebo ke vzniku miniaturních černých děr, jež by bylo možno pozorovat díky jejich naprosté neprůhlednosti k vysokoenergetickým partonům, které by jinak penetrovaly skrze dekonfinovanou zónu. Této problematice se autor hodlá, spolu s kolegy teoretiky z FJFI, rovněž věnovat.

4.14 Studium lokalizovaných fluktuací metodami vlnkové analýzy a analýzy s proměnným rozlišením

V rámci hledání disorientovaného chirálního kondenzátu a při studiu možné granularity srážkové oblasti vyvstala potřeba hledání lokalizovaných oblastí, ve kterých vykazuje četnost nabitých a neutrálních π mezonů specifické fluktuace. Neobvykle vysoké fluktuace mohou provázet koherentní produkci pionů při jaderných srážkách, jež je důsledkem rozpadu oblasti disorientovaného chirálního kondenzátu (DCC), kde v počáteční fázi srážky došlo ke znovuustavení chirální symetrie [25]. Topologická struktura chirálního kondenzátu nebo granulární vyzařující oblasti může být rovněž netriviální [29]. Další teoretický přístup uvádí, že ke koherentní produkci pionů může docházet koherentním zesílením klasického pionového pole v průběhu chladnutí QGP [26].

Pro případ DCC bylo navrženo několik vlnových funkcí popisujících jeho rozpad [27]. Nejatrativnějšími kandidáty se zdají být kartézský stlačený (squeezed) stav a kartézský pionový koherentní stav. Tyto případy se liší fluktuací počtu pionů. V případě koherentního stavu fluktuuje počet pionů jako $1/\sqrt{N}$, v případě squeezed stavu pak jako N .

Již experiment WA98 provedl analýzu hledající disorientovaný chirální kondenzát pomocí globálních charakteristik srážky [7] **, která stanovila horní limit frekvence výskytu domén DCC v závislosti na jejich velikosti. Vzhledem k tomu, že velké globální DCC domény nebyly pozorovány, soustředil jsem se na vývoj metodiky schopné detekovat menší lokalizované domény.

V tomto případě je nutno analyzovat lokální fluktuace počtu nabitých $N_{ch}(\eta, \varphi)$ a neutrálních $N_{\gamma}(\eta, \varphi)$ částic, kde η je psudorapidita a φ azimutální úhel. Za tímto účelem bylo vyvinuto několik takzvaných event-by-event metod studující chování sledovaných veličin v jednotlivých srážkách. Obzvláště vhodnou se ukázala metoda vlnkové (waveletové) transformace, která umožňuje identifikovat fluktuace na různých škálách [28]. Nevýhodou vlnkových metod je existence umělých hranic, které vznikají v důsledku diskretizace (η, φ) roviny. Pokud taková hranice dělí lokalizovanou doménu, může dojít k tomu, že algoritmus není schopen doménu zjistit a rekonstruovat. Tento problém je nutno řešit několikerým opakováním analýzy srážky s různě položenými hranicemi dělení.

Autor vypracoval metodu lokální analýzy s proměnným rozlišením (MRA) založenou na použití dvojrozměrné Cauchy-Lorentzovy distribuční funkce

$$L(\varphi, \eta, \varepsilon_{\varphi}, \varepsilon_{\eta}) = \sum_{k=1}^{N_{cl}} \frac{1}{\pi^2} \frac{(\varepsilon_{\varphi} + \varepsilon_{\varphi 0k})(\varepsilon_{\eta} + \varepsilon_{\eta 0k}) Q_k e}{\{(\varphi - \varphi_k)^2 + (\varepsilon_{\varphi} + \varepsilon_{\varphi 0k})^2\} \{(\eta - \eta_k)^2 + (\varepsilon_{\eta} + \varepsilon_{\eta 0k})^2\}}$$

kde η, φ je pozice v níž funkci vyhodnocujeme, $\varepsilon_{\varphi}, \varepsilon_{\eta}$ jsou odpovídající rozlišení, $\varepsilon_{\varphi 0k}$ a $\varepsilon_{\eta 0k}$ jsou polohově závislá intrinsická rozlišení SDD použitého k měření rozdělení četnosti nabitých částic a φ, η_k udávají polohy průletu jednotlivých částic detektorem. Q_k je náboj deponovaný k-tou částicí v detektoru a e je efektivita rekonstrukce.

S nárůstem faktorů rozlišení $\eta, \varphi, \eta, \eta$ hladce klesá rozlišení. Obdobně jako pro waveletové funkce můžeme definovat funkci popisující fluktuaci v intervalu rozlišení $\varphi, \eta, \varepsilon 1_{\varphi}, \varepsilon 1_{\eta}, \varepsilon 2_{\varphi}, \varepsilon 2_{\eta}$ jako rozdíl Lorentzových funkcí pro rozlišení $\varphi, \eta, \varepsilon 1_{\varphi}, \varepsilon 1_{\eta}$ a $\varphi, \eta, \varepsilon 2_{\varphi}, \varepsilon 2_{\eta}$

$$F(\varphi, \eta, \varepsilon 1_{\varphi}, \varepsilon 1_{\eta}, \varepsilon 2_{\varphi}, \varepsilon 2_{\eta}) = L(\varphi, \eta, \varepsilon 2_{\varphi}, \varepsilon 2_{\eta}) - L(\varphi, \eta, \varepsilon 1_{\varphi}, \varepsilon 1_{\eta})$$

přičemž $\varepsilon 1_{\varphi} < \varepsilon 2_{\varphi}$ a $\varepsilon 1_{\eta} < \varepsilon 2_{\eta}$.

Pokud zvolíme několik pevných rozlišení, můžeme rekonstruovat rekurzivně škálovací funkce s vyšším rozlišením jako součet škálovací funkce s nižším rozlišením a fluktuační míry mezi dvěma rozlišeními.

$$L(\varphi, \eta, \varepsilon 1_{\varphi}, \varepsilon 1_{\eta}) = L(\varphi, \eta, \varepsilon 2_{\varphi}, \varepsilon 2_{\eta}) + F(\varphi, \eta, \varepsilon 1_{\varphi}, \varepsilon 1_{\eta}, \varepsilon 2_{\varphi}, \varepsilon 2_{\eta})$$

V tomto smyslu je funkce F ekvivalentem otcovské funkce (father function) u waveletové transformace.

Rozdělení amplitud funkce F aplikované na náhodné rozdělení poloh částic v η, φ rovině je Gaussovské a jeho horní limit může být parametrizován jako lineární funkce celkové četnosti částic vznikajících při srážce. Pokud amplituda funkce F v určité oblasti překročí tento limit šumu, můžeme stanovit velikost této oblasti a odhadnout počet částic v ní.

Rozlišení by měla být zvolena tak, aby odpovídala přibližně 0.5 velikosti domény. V daném případě byla zvolena rozlišení $\varepsilon 1_{\varphi} \approx 30$, $\varepsilon 1_{\eta} \approx 0.3$.

Nabitě částice vytvářejí v SDD náboj Q_{clu} , který fluktuuje dle Landauova rozdělení. Pro doménu obsahující N částic můžeme díky centrálnímu limitnímu teorému odhadnout počet částic v doméně jako

$$N_{mip} = \frac{\sum_{Sdomain} Q}{\langle Q_{mip} \rangle}$$

Do domény sumujeme přes všechny spojené elementy $d\phi d\eta$, pro které platí $F > F_{maxnoise}$. Vliv nerozpoznaných dvojhitů je díky vážení nábojem do značné míry eliminován.

Citlivost metody tedy není určena celkovou relativní frakcí pionů vzniklých v DCC, ale lokálním poměrem π_{DCC}/π_{domena} .

Popsaná metoda tedy umožňuje nejen detekci lokalizovaných domén, ale rovněž popis jejich vlastností. Metodu bude možno aplikovat rovněž při detekci jetů v prostředí s vysokou četností částic či při studiu možné granularity oblasti produkce částic. Tato metoda byla prezentována jako poster na konferenci Quark Matter '97 v Tsukube [9]**.

5 Závěr

Na tomto místě je třeba nastínit perspektivu fyzikálního programu, jemuž se autor a jeho spolupracovníci ve skupině experimentální jaderné fyziky budou v blízké budoucnosti věnovat.

Se spuštěním experimentu ALICE na urychlovači LHC dostane světová komunita fyziků zabývajících se studiem ultrarelativistických jaderných srážek a vlastností kvarkgluonového plazmatu do rukou nástroj, který umožní pohled do doposud nedostupné oblasti nejvyšších hustot energie (a teplot), při kterých může nejdéle existovat dekonfinované fáze jaderné hmoty. Experiment ALICE doplní spektrum experimentů zabývajících se touto problematikou, které byly či jsou provozovány na urychlovačích SPS a RHIC, a tím umožní komplexnější pohled na studovaný problém. Ze zkušenosti posledních let je zřejmé, že právě komplexní pohled zahrnující výsledky pozorování mnoha veličin v závislosti na energii a velikosti srážených jader může detailně objasnit vlastnosti dekonfinované fáze - kvarkgluonového plazmatu, způsob jakým vzniká v počáteční fázi srážky a způsob jeho rozpadu v procesu hadronizace a s ní spojeného fázového přechodu. Proto se autor a jeho spolupracovníci budou věnovat nejenom primárnímu cíli - fyzice v experimentu ALICE, ale rovněž experimentům při nižších energiích (STAR, CERES) a ve vzdálenější budoucnosti též experimentu CBM. Sjednocující tematikou na všech těchto experimentech bude studium produkce půvabných částic, studium dvou a vícečásticových korelací, studium vlastností dekonfinovaného média pomocí studia lokalizovaných fluktuací, lokalizovaných domén zvýšené produkce částic a chování jetů v prostředí jaderných srážek. Studován bude rovněž charakter počáteční fáze jaderné srážky předcházející vzniku rovnovážného plazmatu. V uvedených oblastech bychom chtěli skloubit experimentální výsledky s aktivně rozvíjeným teoretickým popisem.

Z hlediska detektorového se budeme věnovat zejména křemíkovým driftovým detektorům a systémům řízení experimentu.

S uvedenou strukturou fyzikálního programu zabezpečeného dostatečným počtem spolupracovníků a studentů bychom chtěli vybudovat v rámci Centra pro fyziku ultra-relativistických jaderných srážek se sídlem na FJFI tým schopný konkurence na mezinárodním fóru.

6 Použitá literatura

Poznámka: Autor je spoluautorem publikací označených v textu * a je autorem nebo se výrazně podílel na publikacích označených **

[1] Yves Schutz, <http://www-subatech.in2p3.fr/photons/subatech/physics/potpourri/index.html>

- [2] J. Kapusta, B. Mueller, J. Rafaełski: Quark-Gluon Plasma, Theoretical Foundations; Elsevier, 2003
- [3] R. Vogt: Heavy Ion Physics at the LHC, lecture,
www.osti.gov/energycitations/servlets/purl/840048-udyG6l/native/840048.pdf
- [4] J. Letessier, J. Rafaełski: Hadrons and Quark-Gluon Plasma; Cambridge press, 2002
- [5] Stefan B. Ruster, Verena Werth, Michael Buballa, Igor A. Shovkovy, Dirk H. Rischke,
hep-ph/0503184
- [6] <http://www.cerncourier.com/main/article/42/5/10>
- [7] WA98 Collaboration (M.M. Aggarwal et al.), Phys. Lett. B 420:169-179, 1998 ;
hep-ex/9710015
- [8] V. Petráček, Czech. J. Phys. 48S1:87-96, 1998
- [9] V. Petracek: Application of the MRA method in WA 98 experiment, poster na konferenci Quark Matter '97 v Tsukubě, Japonsko.
- [10] V.Petracek et al., "Large Area Silicon Drift Detector Prototypes for Experiment ALICE" ,
ALICE internal note INT-99-26;
- [11] E. Gatti and P. Rehak, Nucl. Instr. and Meth. 225 (1984) 608.
- [12] E. Gatti, P. Rehak et al., Nucl. Instr. and Meth. A253 (1987) 393-399
- [13] E. Gatti, P. Rehak et al., Nucl. Instr. and Meth. A274 (1989) 469-476
- [14] E. Gatti, A. Vacchi, P. Rehak et al., Nucl. Instr. and Meth. A295 (1990) 489-491
- [15] A. Castoldi, P. Rehak et al., Nucl. Instr. and Meth. A 399 (1997) 227-243
- [16] S. Kushpil et al. , physics/0512057 (akceptován NIM)
- [17] D. Nouais et al., Nucl. Instr. and Meth. A 501 (2003) 119–125
- [18] D. Nouais et al., Nucl. Instr. and Meth. A 477 (2002) 99–103
- [19] S.M. Sze, Physics of Semiconductor devices, 2nd ed. (Wiley, New York, 1981) p. 28.
- [20] ALICE Collaboration, CERN /LHCC / 95–71
- [21] ALICE Collaboration, Physics Performance Report Vol.1, Journal of Physics G vol.3 n.11
(2004) 1517,
- [22] ALICE Collaboration, Physics Performance Report Vol.2, bude publikováno v Journal of
Physics G
- [23] ALICE Collaboration, CERN /LHCC 99–12
- [24] ALICE Collaboration, CERN–LHCC–2003–062
- [25] Rajagopal K. : Disorienting the chiral condensate at the QCD phase transition, hep-ph/97033258
- [26] Abada A., Brise C.M.: Coherent amplification of classical pion fields during the cooling of quark
plasma, preprint MC/TH 96/30

- [27] Amado R.D., Kogan I.I.: Quantum phenomenology for the disoriented chiral condensate, hep-ph/940752
- [28] Huang Z., Sarcevic I., Thews R., Wang X.: Domain structure of the disoriented chiral condensate from a wavelet perspective, preprint AZPH-TH/95-24, LBL 38001
- [29] Suzuki M.: Topologically nontrivial time-dependent chiral condensates, preprint UCB-PTH 96/30, LBNL 39063

7 RNDr. Vojtěch Petráček, CSc. - životopis

7.1 Osobní údaje

Narozen 17.2.1964 v Praze, ženatý.

Adresa pracoviště: Katedra fyziky, FJFIČVUT v Praze, Břehová 7, 115 19 Praha 1

Telefon: +420 224358265

E-mail: Vojtech.Petracek@cern.ch

7.2 Vzdělání

Gymnázium Nad Štolou, Praha, 1979-1982

Matematicko-fyzikální fakulta University Karlovy, 1982-1987

Titul RNDr. obdržel v roce 1987

Titul CSc. obdržel v roce 1995 za práci :

”Studium molekul Cu-ftalocyaninu metodou řádkovací tunelové mikroskopie STM”

7.3 Profesionální kariéra

1987-1992 Interní aspirant na Katedře elektroniky a vakuové fyziky UK

1992-1995 Asistent na téže katedře

1995-1999 Vědecký pracovník v Ústavu jaderné fyziky AVČR v Řeži

1999-2003 Výzkumný pracovník na univerzitě v Heidelbergu

2004- Odborný asistent v oboru experimentální jaderná fyzika na KF FJFIČVUT

7.4 Vědecká aktivita

V období 1987-1994 jsem se zabýval konstrukcí rastrovacích tunelových mikroskopů s atomovým rozlišením. Pomocí těchto zařízení jsem zkoumal vlastnosti malých kovových klastrů a molekul Cu-ftalocyaninu adsorbovaných na zlatých a grafitových površích. Pro interpretaci získaných obrazů a lokálních rozdílů hustoty elektronových stavů jsem vyvinul numerický model popisující tunelování v malých klastrech a za přítomnosti adsorbovaných molekul. Později jsem se účastnil na konstrukci rastrovacího tunelového mikroskopu pracujícího ve vakuu.

Ještě v době, kdy jsem byl zaměstnán na MFF UK jsem započal spolupráci s ÚJF AVČR Řež, kde jsem začal pracovat na experimentu WA98, konkrétně v oblasti křemíkových driftových detektorů (SDD).

Od počátku roku 1995 jsem se připojil ke skupině fyziky ultra-relativistických jaderných srážek v ÚJF AVČR a začal jsem pracovat na vývoji prototypů lineárních SDD pro experiment ALICE na LHC. Naše skupina spolupracovala na tomto programu s týmem z INFN Turín, kde jsem pobýval během let 1995-6 několik měsíců a zapojil jsem se do práce ve skupině Paola Giubellina. V roce 1996 jsem byl odpovědný za provoz radiálního SDD v experimentu WA98. Během přípravy detektoru a později při analýze dat jsem pobýval po 2 měsíce v laboratoři SUBATECH v Nantes, kde jsem pracoval ve skupině Prof. Hanse Gutbroda. Když skončilo období sběru dat v experimentu WA98, zabýval jsem se kalibrací detektoru a analýzou experimentálních dat. Pro lepší pochopení chování detektoru jsem napsal simulační program řešící transport elektronů v detektoru implementující rovněž detektorové defekty a artefakty. Tento program byl použit pro ladění algoritmů použitých pro analýzu dat z experimentu.

Podílel jsem se na přípravě publikací týkajících se disorientovaného chirálního kondenzátu (DCC), kde naše kolaborace stanovila horní limit výskytu a prostudovala lokalizované fluktuace v četnosti nabitých a neutrálních částic.

V rámci projektu SDD pro detektor ALICE jsem se zabýval studiem radiačního poškození křemíku způsobeného rychlými neutrony. Během pobytu v Instrumentation Division v BNL, ve skupině Pavla Reháka jsem navrhl velkoplošný lineární křemíkový driftový detektor, který měl být použit v experimentu ALICE. Později jsem byl odpovědný za jeho výrobu v ČR. Vyrobenou prototypovou sérii detektorů jsme, spolu s kolegy z ÚJF AVČR, otestovali na svazku urychlovače SPS v CERN. Další výrobě těchto SDD zabránily ekonomické problémy firmy ICM, která výrobu realizovala. Ač tyto prototypy nenašly uplatnění v detektoru ALICE, byly použity pro experiment DISK v JINR Dubna. Za návrh a realizaci těchto detektorů jsem byl oceněn Cenou akademie věd ČR pro mladé vědecké pracovníky v roce 1998.

Od roku 1998 jsem začal pracovat na experimentu NA45/CERES na urychlovači SPS v CERN, kde jsem byl odpovědný za provoz elektroniky detektorů RICH a podílel jsem se na přípravě a provozu radiálních SDD pracujících ve vrcholovém teleskopu experimentu.

V červnu 1999 jsem se připojil ke skupině Prof. Johanny Stachel ve fyzikálním ústavu university v Heidelbergu. Kromě již zmíněné experimentální aktivity jsem se účastnil analýzy dat a kalibrace detektorů pro data z let 1999 a 2000. Přispěl jsem k simulacím SDD studiem defektů SDD, vlivu elektrických šumů na rekonstrukci polohy a k interkalibraci mezi detektory RICH a SDD. Hlavní část mé analytické práce však byla věnována měření produkce půvabných částic - D mezonů - z jejich hadronových rozpadů ($D^{+/-}K$, $D^{+/-}KK$) pomocí rekonstrukce sekundárních rozpadových vrcholů v datech naměřených v roce 1996. Vyvinul jsem postup zvyšující přesnost rekonstrukce sekundárních rozpadových vrcholů a metodiku selekce dat, jejichž výsledkem je pozorování signálu odpovídajícího D mezonu ve spektru invariantních hmot. Vyvinul jsem rovněž programy potřebné pro simulaci a analýzu dat.

Naše skupina pracovala rovněž na detektoru přechodového záření (TRD) pro experiment ALICE. V rámci tohoto projektu jsem byl odpovědný za koordinaci vývoje řídicího systému detektoru (DCS) a podílel jsem se na testech komor TRD.

Od roku 2004 jsem přešel na FJFI ČVUT, kde jsem odpovědný za specializaci experimentální jaderná fyzika a vedu vědecký tým, který v rámci experimentu ALICE pokračuje ve vývoji řídicího systému detektoru SDD ITS a v analýze dat. V rámci experimentu CERES pak v analýze produkce půvabných částic při srážkách těžkých iontů. V rámci vývoje SDD pro experiment ALICE jsem se zúčastnil několika testů detektorů na svazku a zabýval jsem se studiem vlivu radiačního poškození na činnost detektoru. V rámci své funkce vedoucího projektu ITS ČR jsem pracoval na dokončení produkce a testech napájecích zdrojů pro detektory SDD.

Z fyzikálního hlediska se v experimentu ALICE připravujeme opět na studium produkce těžkých kvarků, na studium fluktuací v produkci částic, na detekci a zkoumání vlastností jetů v jaderných srážkách a na studium částicových korelací. V delší perspektivě se zapojíme rovněž do budování experimentu CBM v GSI Darmstadt, který bude studovat produkci půvabných kvarků v husté a horké jaderné hmotě. Pro tento experiment jsem provedl úvodní simulace pro přípravu rekonstrukce nabitých D mezonů z jejich hadronových rozpadů.

Od počátku roku 2007 jsem se stal vědeckým ředitelem Centra pro fyziku ultra-relativistických jaderných srážek.

7.5 Pedagogická aktivita

Během zaměstnání na MFF UK jsem po několik semestrů vyučoval v základní praktiku (mechanika, elektřina a magnetismus, optika, vakuová fyzika). Vedl jsem jednoho diplomanta Zsolta Radiho, který pracoval na problému tunelové spektroskopie vibračních stavů adsorbovaných molekul.

V roce 1997 jsem navštívil univerzitu v Tsukubě, kde jsem ve skupině Prof. Mijakeho pracoval po dobu 6 týdnů, kdy jsem vedl dvojici studentů, které jsem učil ovládat SDD.

Na univerzitě v Heidelbergu jsem v letech 1999-2003 vyučoval jednak v základním fyzikálním praktiku, jednak ve fyzikálním praktiku pro studenty medicíny a posléze v pokročilém praktiku, kde jsem se staral o úlohy s radioaktivitou a rentgenovými paprsky. Byl jsem rovněž konzultantem doktorandky v oblasti analýzy produkce D mezonů.

Od roku 2004 vyučuji na FJFI ČVUT experimentální fyziku, relativistickou fyziku těžkých iontů a posléze též subatomovou fyziku. Po několik semestrů jsem vyučoval rovněž ve fyzikálním praktiku. Pro studenty organizuji semináře a starám se o chod zaměření, jehož jsem garantem. Vedu rovněž studentské práce na všech úrovních a mám jednoho doktoranda pracujícího na problematice rekonstrukce nabitých D mezonů v experimentu ALICE.