

20 rokov Slovenska v CERN-e



Výbor pre spoluprácu Slovenskej republiky s CERN-om



Ministerstvo školstva, vedy, výskumu a športu
Slovenskej republiky

Dvadsať rokov Slovenska v CERN-e

Obsah

Predslov	3
1 CERN B. Sitár	4
2 História fyziky vysokých energií pred vstupom SR do CERN-u J. Pišút, B. Sitár, L. Šándor	10
3 Vstup Slovenskej republiky do CERN-u L. Šándor	16
4 Dvadsať rokov práce slovenských fyzikov v CERN-e B. Sitár, P. Chochula	18
5 Experiment ATLAS D. Bruncko, S. Tokár	25
6 Štúdium hmoty v extrémnych podmienkach v experimente ALICE I. Králik, B. Sitár, P. Chochula	30
7 Experiment DELPHI na LEP P. Chochula, B. Sitár	41
8 Dileptóny a podivné častice v zrážkach ťažkých iónov na SPS L. Šándor	44
9 Experiment NA49 V. Černý, B. Sitár	48
10 Experimenty na zariadení ISOLDE M. Veselský, S. Antalic, M. Venhart	50
11 Príprava experimentu NA62 T. Blažek	52
12 Spolupráca slovenských teoretických fyzikov s CERN-om B. Tomášik, J. Pišút	54

Predslov



Keď som v roku 1975 prišiel prvýkrát do CERN-u, bol som nadšený. Niet sa čomu čudovať, veď som prišiel spoza „železnej opony“. Mal som 29 rokov a ako mladého fyzika ma CERN očaril. Videl som už predtým veľké laboratórium – Spojený ústav jadrových výskumov v Dubne, no CERN bol iný. Predovšetkým atmosférou. Na parkoviskách stáli v lete autá s otvorenými oknami. Na sekretariáte boli otvorené skrine pre všetkých – potrebuješ pero, ceruzku, papier – zober si. Ale najviac fascinujúca bola a je zanosť pre vedu. Tesne pred príchodom do CERN-u som si vypočul prednášku významného fyzika na Univerzite v Durhame. Tvrdil, že fyzika je uzavretá, teória už všetko popísala – netrápme sa, už vieme všetko. Mne sa tie konštatovania veľmi nepáčili, čo sa mi po príchode do CERN-u len potvrdilo. V CERN-e je atmosféra nabitá hľadaním, výskumom, vášnivými rozhovormi. Vo veľkom auditoriu CERN som zažil doslova

ohnivú debatu medzi budúcim laureátom Nobelovej ceny Carlom Rubbiom a laureátom Nobelovej ceny Jackom Steinbergerom. Ich dialóg bol naozaj expresívny, všetci sme sa na tom v sále bavili, ale zároveň to bolo úžasne inšpirujúce. Znova som sa utvrdil, že fyzika je krásna, prítiahľivá a práve preto jej fyzici zasväcujú svoj život.

Pre fyzikov v CERN-e je charakteristická pracovitosť, húževnatosť, nasadenie, tolerantnosť, rasová znášanlivosť ale aj zdravá rivalita. V CERN-e som nikdy nemal pocit, že niekto sa vyvyšuje, lebo je Nemec, Američan alebo Japonec. Vždy som mal pocit, že sme si rovní, aj keď som z najmenšieho členského štátu CERN-u. Preto je CERN moja srdcová záležitosť a som presvedčený, že je to tak aj u mojich slovenských kolegov pracujúcich v CERN-e.

CERN však nie je len o medziľudských vzťahoch. Je to predovšetkým o smelých víziách a o úžasnom nasadení pri ich realizácii. Ako príklad uvediem výstavbu LHC – najväčšieho stroja na svete s dĺžkou 27 km. LHC obsahuje 2000 supravodivých magnetov pracujúcich pri teplote 1,9 Kelvina, čo je menej ako teplota vo vesmíre. Desaťtisíc spojov medzi magnetmi musí mať odpor menší ako 10 nano ohmov. Keď si toto všetko uvedomíte, poviete si, že ľudia, ktorí pred 25 rokmi navrhli LHC, museli mať „šialenú“ odvalu. A tí, ktorí to realizovali, museli byť veľmi schopní.

Poslaním CERN-u je robiť základný výskum v oblasti štruktúry hmoty. Chceme poznať hmotu do najmenších detailov, lebo nevieme, čo sa v nej ešte ukrýva. Tak ako sme nevedeli pred objavom atómového jadra, akou obrovskou energiou disponuje. Ak budeme dobre poznať vlastnosti hmoty, budeme ich vedieť aj využiť.

Z CERN-u však nevychádzajú len fyzikálne výsledky najvyššej kvality ale aj takzvané vedľajšie produkty, ktoré sú niekedy veľmi užitočné. Spomeniem napríklad Web (www) vymyslený v CERN-e, bez ktorého by Internet nefungoval tak efektívne. Za pomoci CERN-u sa zrodili gama kamery hojne využívané v našich nemocniciach. Technológia supravodivých magnetov sa v CERN-e posunula na vysokú úroveň a teraz je predmetom záujmu špecialistov budujúcich fúzny reaktor ITER ale aj iné energetické zariadenia budúcnosti.

Slovensko je od roku 1993 členským štátom CERN-u. Tým sa stalo fakticky jeho spolumajiteľom a má prístup ku všetkým vynálezom a technológiám bezplatne. Má tiež právo zúčastňovať sa na dodávkach zariadení a technológií do CERN-u. Niektoré slovenské podniky to využívajú tak úspešne, že návratnosť investície do CERN-u je vysoká. Počas mnoho rokov Slovensko získavalo z CERN-u viac financií ako doň platilo.

Pre uvedené skutočnosti my, ktorí máme to šťastie pracovať v CERN-e, toto laboratórium milujeme. Mal som šťastie ako viceprezident rady CERN poznať aj „kuchyňu“ CERN-u. Je naozaj inšpirujúce úzko spolupracovať s ľuďmi vo vedení CERN-u, človek sa veľa naučí. Úžasnú atmosféru v CERN-e vytvárajú predovšetkým mladí ľudia z celého sveta. Keď sa v jedálni alebo na káve pozriete okolo seba a vidíte vášnivé debaty (no o čom inom ako o fyzike) ľudí z rôznych krajín, rôznych svetadielov, s rôznou farbou kože, poviete si: takto by mal vyzeráť svet – bez vojen, bez rozporov, v porozumení a spoločnom úsilí o krajší, čistejší, bohatší, lepší a múdrejší svet.

Som veľmi šťastný, že aj my Slováci k úspechom CERN-u už 20 rokov svojou troškou prispievame. Táto publikácia dosvedčí, že slovenskí fyzici majú v CERN-e silné postavenie a ich troška je dosť viditeľná.

Branislav Sitár

predseda Výboru pre spoluprácu SR s CERN-om

1 CERN

Európska organizácia pre jadrový výskum CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) so sídlom v Ženeve je najvýznamnejšia medzinárodná organizácia pre výskum v oblasti štruktúry hmoty. Ideu založenia Európskeho laboratória predložil Louis de Broglie v Lausanne v roku 1949. Na stretnutí v UNESCO v Paríži v decembri 1951 bola predložená rezolúcia o vytvorení CERN-u (obr. 1.1). V júni 1953 dvanásť krajín podpísalo zmluvu o založení CERN-u. Výkopové práce na mieste budúceho laboratória začali 17. mája 1954 na švajčiarsko-francúzskej hranici neďaleko Ženevy (obr. 1.2). Po ratifikácii zmluvy začal CERN oficiálne fungovať od 29. septembra 1954.



Obr. 1.1 Prvé zasadanie Rady CERN

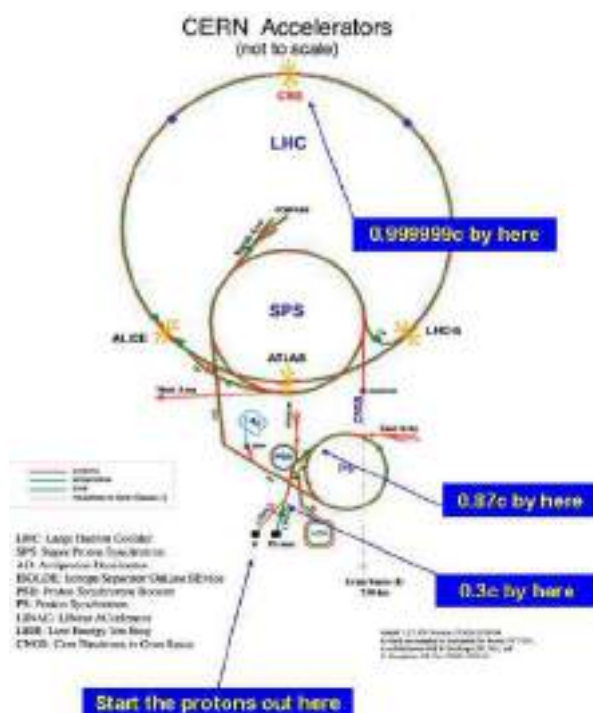
Fyzika elementárnych častíc patrí medzi atraktívne oblasti základného fyzikálneho výskumu. Názorne to dokumentuje skutočnosť, že za posledných 50 rokov asi tretina Nobelových cien za fyziku bola udelená za teoretické i experimentálne práce práve v tomto odbore. Špičkový experimentálny výskum v tejto oblasti je mimoriadne náročný, vyžaduje si obrovské a drahé zariadenia – urýchľovače častíc a jadier na veľmi vysoké energie, ako aj veľké technologicky náročné komplexy detektorov častíc. Budovanie a prevádzka takýchto zariadení je mimo kapacitných i finančných možností jednotlivých, najmä menších, krajín. Preto sme svedkami koncentrácie experimentálneho výskumu v časticovej fyzike, ktorej sa hovorí aj fyzika vysokých energií, do niekoľkých veľkých medzinárodných centier. Jedným z najvýznamnejších je CERN, ktorý si v roku 2014 pripomenie 60. výročie svojho založenia. CERN je najväčším vedeckým laboratóriom na svete, v súčasnosti má vyše 600 budov a objektov. V roku 2012 ho využívalo okolo 11 500 fyzikov z celého sveta. Predstavuje svetovú špičku v oblasti výskumu najjemnejšej štruktúry hmoty.

Stal sa vzorom veľmi efektívnej medzinárodnej spolupráce a svetovým lídrom v oblasti fyziky elementárnych častíc.



Obr. 1.2 Prvé výkopové práce 17. mája 1954 na mieste budúceho CERN-u na švajčiarsko-francúzskej hranici neďaleko Ženevy

CERN prevádzkuje urýchľovače, pomocou ktorých získava protóny alebo atómové jadrá pri veľmi vysokých energiách. V súčasnosti je lídrom v energii, na ktorú dokáže častice urýchľovať. Protóny a jadrá sa nedajú urýchliť na najvyššie energie v jedinom urýchľovači. V CERN-e je na to potrebná kaskáda urýchľovačov v poradí: 1. Lineárny urýchľovač, 2. Protónový synchrotrón a booster (PSB),



Obr. 1.3 Komplex urýchľovačov v CERN-e synchrotrón (SPS) a 4. Veľký hadrónový zrážač (Large Hadron Collider–LHC) (obr. 1.3). V každom

z urýchľovačov sa energia zvyšuje, až v LHC dosiahla energia protónov 4 TeV (2012). Urýchľovače sa v CERN-e budovali postupne.

Urýchľovací komplex CERN

PSB - Protónový synchrotrón a booster

Ako prvý v CERN-e vybudovali v roku 1957 Synchrociklotrón na energiu 600 MeV. Tento urýchľovač už neexistuje. V roku 1959 začal pracovať vtedy najväčší urýchľovač na svete Protónový synchrotrón (PS), ktorý doteraz urýchľuje protóny na energiu 28 GeV. Na Protónový synchrotrón nadväzuje booster (PSB), v ktorom sa nahromadením a grupovaním protónov do zhlukov (bunch) výrazne zvyšuje intenzita protónového zväzku.

ISR – Intersecting Storage Ring

Protónový akumulátor a zrážač ISR bol uvedený do prevádzky v roku 1971 a pracoval do roku 1984. Bolo to prvé zariadenie, v ktorom prebiehali zrážky protibežných protónov a tiež protónov s antiprotónmi. Na ISR sa jasne ukázala výhoda použitia zrážača (collider), v ktorom sa plne využije energia zrážajúcich sa častíc na tvorbu nových ťažkých exotických častíc. Funkcia zrážača je ukázaná na obr. 1.4 a je podrobnejšie vysvetlená nižšie – na príklade LHC. Jasne sa demonštrovala možnosť tvorby hmotných častíc (v pároch s antičasticami) podľa vzorca $E = mc^2$. Z kinetickej energie protónov sa môžu pri ich zrážkach vytvoriť častice aj 100 krát ťažšie ako samotné protóny (napr. W, Z alebo H bozón, alebo top kvark).

SPS – Super Protónový Synchrotrón

SPS bol uvedený do prevádzky v júni 1976 a je neustále zdokonaľovaný. SPS sa skladá z 1317 magnetov, má obvod 7 km a je umiestnený 40 m pod povrchom zeme pod švajčiarsko-francúzskou hranicou. Urýchľuje protóny na energiu až 450 GeV. Urýchlené protóny sú vyvedené z urýchľovača a dopadajú na terčik. Takéto experimenty sa nazývajú „experimenty s pevným terčom“. V roku 1986 sa začal urýchľovač SPS používať aj na urýchľovanie atómových jadier. Urýchľujú sa všetky jadrá až po olovo s maximálnou energiou 158 GeV na nukleón. Pri štúdiu interakcií ťažkých iónov bolo získaných mnoho významných fyzikálnych poznatkov, hlavne na experimentoch NA49 a NA57.

Vyvedené protóny (resp. ióny) z urýchľovača sa nazývajú primárnym zväzkom. Urýchľovače v CERN-e poskytujú aj sekundárne zväzky, ktoré obsahujú iné častice ako napríklad π -mezóny, K-mezóny, hyperóny, antiprotóny, μ -mezóny alebo neutrína. Sekundárne zväzky sa získavajú inter-

akciou protónov s primárnym terčom a následnou separáciou príslušných častíc pomocou sústavy elektromagnetov a kolimátorov. Na sekundárnych zväzkoch bolo v CERN-e vykonaných mnoho významných fyzikálnych experimentov. Veľmi zaujímavým je napríklad experiment CNGS v ktorom neutrína vytvorené v CERN-e preleteli zemou 800 km do laboratória Gran Sasso pri Ríme, kde ich registrovali (do 2012). Experiment CNGS bol zameraný na štúdium oscilácií neutrín. CERN pripravuje ďalšie veľké projekty tohto typu (napr. LAGUNA).

V roku 1981 bol SPS prebudovaný na protón-antiprotónový zrážač a v roku 1983 boli na ňom objavené neutrálne toky, W^+ , W^- a Z^0 bozóny, ktoré sú základným kameňom teórie elektroslabých interakcií. Za tieto objavy dostali Carlo Rubbia a Simon van der Meer Nobelovu cenu.

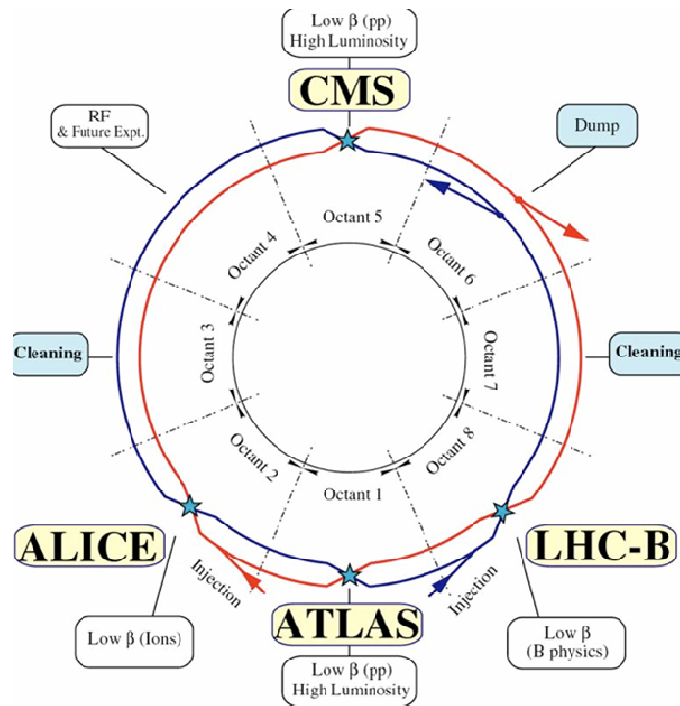
LEP – Large Electron-Positron Collider

V roku 1989 bol v CERN-e spustený dosiaľ najväčší urýchľovač a zrážač elektrónov a pozitronov na svete LEP. Skladal sa 5 176 magnetov a 128 urýchľujúcich rezonátorov umiestnených v 27 km dlhom kruhovom tuneli zhruba 100 m pod zemou. V roku 2000 bola dosiahnutá rekordná energia elektrónov a pozitronov v mieste zrážky: až 209 GeV. LEP sa stal „Z-továrňou, keď vyprodukoval až 17 miliónov Z^0 bozónov. Na LEP pracovali v štyroch miestach zrážok e^+e^- veľké detektory: ALEPH, DELPHI, L3 a OPAL. Počas 11 rokov práce na LEP boli detailne preštudované elektroslabé interakcie a bolo dokázané že existujú práve tri generácie elementárnych častíc. Mnohé poznatky získané na LEP potvrdili predpovede Štandardného modelu.

LHC – Large Hadron Collider

LHC je najväčší stroj na svete, vybavený špičkovou supravodivou technológiou. Po úplnom dokončení bude LHC urýchľovať protóny na energiu 2×7 TeV (10^{12} eV). Urýchľovač pracuje ako zrážač (collider) protibežných zväzkov. Zrážajú sa v ňom protóny cirkulujúce vo vákuovej trubici v smere pohybu hodinových ručičiek s protónmi v druhej vákuovej trubici pohybujúcimi sa proti smeru pohybu hodinových ručičiek. Obvod tunelu 100 m pod zemou (pôvodne tunel LEP) je 27 km. Zväzky protónov ho obehnú 11 000 krát za sekundu. Kruhové trubice s vysokým vákuom a priemenom len 4 cm sú umiestnené v 2000 supravodivých magnetoch s teplotou 1,9 Kelvinov – nižšou ako vo vesmíre. Intenzívne zväzky – vyše 100 miliárd protónov v jednom zhluku – (bunch) sa zrážajú v štyroch interakčných bodoch. Po celom obvode LHC môže cirkulovať až do 2800 zhlukov protónov. Okolo interakčných bodov v LHC pracujú štyri veľké

experimenty (obr. 1.4). Okrem protónov sú v LHC urýchľované aj atómové jadrá až po olovo. Na LHC možno študovať zrážky pp (protón s protónom), pA (protóny s jadrami), alebo AA (jadrá s jadrami).



Obr. 1.4 Schéma LHC

Začiatkové nadšenie po spustení LHC v septembri 2008 bolo narušené haváriou spôsobenou chybnými spojeniami medzi supravodivými magnetmi. Pri havárii vznikol elektrický oblúk, ktorý prepálil kryogénnu nádobu magnetu. V dôsledku toho sa kvapalné hélium splynulo a nádoba vybuchla. Výbuch posunul magnety v dĺžke 700 metrov. Päťdesiatjeden magnetov muselo byť vymenených. Oprava trvala približne rok a po nej LHC funguje bezchybne a dosahuje plánované energie častíc a intenzity zväzkov a ešte ich prekračuje.

Na urýchľovacom komplexe LHC sa robia fyzikálne experimenty od roku 2010. V roku 2011 LHC dodal pri energii $2 \times 3,5$ TeV integrálnu svietivosť 6/fb a v roku 2012 pri energii 2×4 TeV integrálnu svietivosť 23/fb. Začiatkom roka 2013 na LHC v priebehu 3 týždňov všetky experimenty študovali interakcie protón-olovo pri rekordnej energii 5,02 TeV. Na roky 2013–2014 je plánovaná rekonštrukcia LHC (Long Shutdown 1). Cieľom rekonštrukcie je dosiahnutie maximálnej projektovanej energie protónov 2×7 TeV. CERN plánuje robiť experimenty na LHC až do rokov 2030–2035. Do roku 2021 je naplánované dosiahnuť integrovanú svietivosť 300/fb. Potom sa má uskutočniť veľká rekon-

štrukcia LHC na HL (High Luminosity) LHC s cieľom dosiahnuť integrovanú svietivosť 3000/fb. V roku 2013 CERN začal testovať nový lineárny urýchľovač LINAC 4, ktorý umožní výrazné zvýšenie intenzity zväzkov. Na plné využitie HL LHC bude potrebné zmodernizovať PSB, SPS a aj všetky detektory.

Detektory

CERN je tiež vedúcim laboratóriom vo vývoji detektorov elementárnych častíc. V roku 1968 skupina Georgesa Charpaka vyvinula mnohovláknové proporcionálne komory a driftové komory. Nové detektory umožnili mnohonásobne zvýšiť rýchlosť zápisu dát z interakcií častíc, čo umožnilo štúdium oveľa zriedkavejších procesov a v konečnom dôsledku objav nových častíc a ťažkých kvarkov. V roku 1992 dostal za tento vývoj Georges Charpak Nobelovu cenu.

Okolo interakčných bodov LHC pracujú štyri experimenty (obr. 1.4): ATLAS a CMS určené na štúdium zrážok protónov, ALICE na štúdium zrážok ťažkých jadier a LHC-B na výskum malých rozdielov medzi hmotou a antihmotou štúdiom častíc s b-kvarkom.

ATLAS

Je najväčším experimentom na svete (výška šesťposchodového domu a vyše sto miliónov elektronických kanálov). Spolupracuje na ňom okolo 3500 fyzikov z celého sveta. Cieľom experimentov ATLAS a CMS je študovať protón-protónové zrážky pri najvyšších energiách. Experimentom sa podarilo nájsť Higgsov mechanizmus zodpovedný za to že častice môžu mať pokojovú hmotnosť. Hľadajú sa ďalšie exotické častice, napríklad supersymetrické (SuSy) častice a podobne. Nájdienie takýchto častíc by patrilo medzi najväčšie objavy a umožnilo by nám hlbšie poznať štruktúru hmoty.

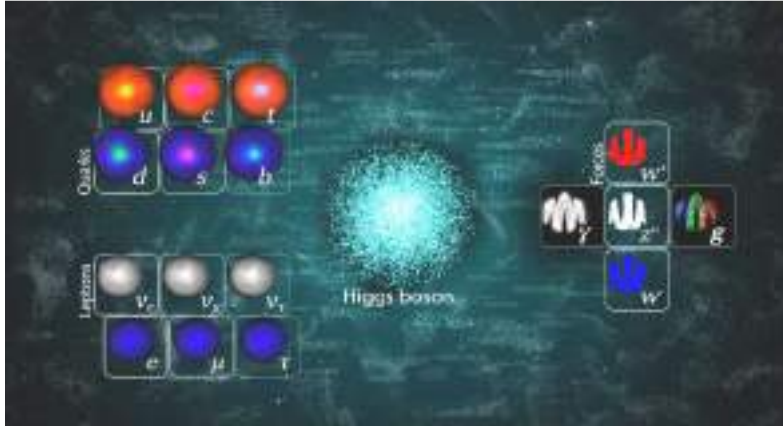
ALICE

Experiment ALICE (vyše 1000 fyzikov) je určený predovšetkým na štúdium zrážok ťažkých jadier pri extrémne vysokých energiách. Pritom sa v mieste zrážky jadier na krátky čas vytvoria podmienky podobné tým, ktoré existovali v ranom vesmíre veľmi krátko po Veľkom tresku. Tento stav sa vyznačuje obrovskou teplotou, pri ktorej sa protóny a neutróny, z ktorých sa skladá náš svet, „roztopia“ na kvarky a gluóny. Vznikne tak úplne nová forma hmoty – kvarkovo-gluónová plazma.

Najväčšie úspechy základného výskumu štruktúry hmoty v CERN-e

Objav W^+ , W^- a Z^0 bozónov v roku 1983

V roku 1981 bol SPS prebudovaný na protón-antiprotónový zrážач a v roku 1983 boli na ňom objavené bozóny W^+ , W^- a Z^0 , ktoré sprostredkujú



Obr. 1.5 Schéma Štandardného modelu s Higgsovým bozónom

elektroslabú interakciu. Za tento objav dostali Carlo Rubbia a Simon van der Meer Nobelovu cenu.

Dnes možno pomocou vysokoenergetických zrážok elementárnych častíc na LHC študovať štruktúru hmoty na vzdialenostiach až 10^{-18} – 10^{-19} m. LHC možno považovať za najväčší mikroskop na svete. Všetky detektory na LHC kvalitne registrujú a spracovávajú interakcie protónov z tohto urýchľovača. Na experimentoch ATLAS a CMS možno efektívne študovať vlastnosti ťažkých exotických častíc ako W a Z bozóny, top kvarky a tiež Higgsove bozóny.

Úspešné testy Štandardného modelu v CERN-e

Štandardný model súčasne opisuje elektromagnetické, slabé a silné interakcie v súlade s experimentálnymi údajmi. (Za odchýlky od neho možno považovať napríklad pozorovanie oscilácií neutrín.) Štandardný model má však veľa parametrov, ktoré treba určiť z experimentu a stojí na tzv. Higgsovom mechanizme. Model bol overený mnohými experimentálnymi výsledkami predovšetkým na LEP a LHC. V poslednej dobe experiment LHCb oznámil dôkaz existencie rozpadu $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ s pravdepodobnosťou zodpovedajúcou Štandardnému modelu. Tento experiment získal aj ďalšie nové poznatky o rozpade $B_s^0 \rightarrow 2\Phi$ a pozoroval tiež výrazné oscilácie B_s^0 v súlade s teóriou.

Objav Higgsovho bozónu

V roku 2012, 48 rokov po teoretickej predpovedi, bol objavený Higgsov bozón čo umožnilo

akceptovať Brout-Englert-Higgsov mechanizmus narušenia elektroslabej symetrie. Toto možno považovať za míľnik v rozvoji fyziky. CERN 4. 7. 2012 oznámil historický úspech, že na experimentoch ATLAS a CMS bola objavená nová častica s hmotnosťou ekvivalentnou energii 125–126 GeV, ktorá je s veľkou pravdepodobnosťou Higgsovým bozónom v súlade so Štandardným modelom. (obr. 1.5).

Mnohí časticoví fyzici však predpokladajú, že štandardný model nie je konečnou teóriou elementárnych častíc.

Čo neobsahuje Štandardný model?

V CERN-e sa fyzici snažia nájsť odpoveď na veľmi závažné otázky, ktoré neopisuje Štandardný model, napríklad:

- prečo existujú práve 3 typy (rodiny) fundamentálnych častíc (leptónov a kvarkov)?
- prečo sú hmotnosti častíc práve také, ako ich poznáme?
- ako došlo k nerovnováhe medzi množstvom hmoty a antihmoty v procese baryogenézy?
- prečo pozorujeme oscilácie neutrín?
- existujú ďalšie, doteraz neznáme typy častíc a síl v prírode?
- sú kvarky, gluóny ale aj leptóny naozaj fundamentálne častice alebo majú svoju vnútornú štruktúru?
- z akých častíc pozostáva tzv. „tmavá hmota“ (dark matter) vo Vesmíre?
- existuje supersymetria?
- nájdeme prejavy veľkých pridaných rozmerov?
- potvrdí sa experimentálne existencia mikroskopických čiernych dier?

Odpovede na uvedené otázky budú hlavnou náplňou práce fyzikov na LHC v najbližších desaťročiach. V CERN-e sa fyzici budú zaoberať aj ďalšími zákonitosťami hmotného sveta.

Hľadanie rozdielov medzi hmotou a antihmotou (CP narušenie)

CERN v apríli 2013 oznámil dôležitý výsledok pozorovania asymetrie medzi hmotou a antihmotou pri rozpade častice B_s^0 v prospech hmoty. Tento jav je dôsledkom narušenia CP symetrie. Výskum procesov narušenia CP symetrie má dať odpoveď na otázku, prečo sa pri vzniku vesmíru vytvoril malý prebytok protónov nad antiprotónmi, čo umožnilo existenciu nášho hmotného sveta ako ho poznáme.

Štúdium vlastností kvarkovo-gluónovej plazmy

V roku 2000 CERN oznámil, že experimenty **NA44**, **NA45**, **NA49**, **NA50**, **WA97/NA57** a **WA98** pracujúce na zväzkoch olova z SPS poskytli evidenciu o vzniku mimoriadne hustej látky s niektorými neobvyklými vlastnosťami kvarkovo-gluónovej plazmy (Quark-Gluon-Plasma, – QGP). Podľa súčasnej teórie silných interakcií sa neutróny a protóny skladajú z kvarkov a gluónov, ktoré za normálnych podmienok nemôžu vystupovať izolovane v dôsledku ich uväznenia v nukleónoch (confinement). Avšak pri mimoriadne vysokej teplote dosahovanej v zrážkach ťažkých iónov, môžu krátku dobu existovať samostatne v prostredí kvarkovo-gluónovej plazmy a potom sa v procese hadronizácie zase spoja do nukleónov, alebo iných „normálnych“ častíc.

Experimenty na LHC: ALICE, CMS aj ATLAS získali zo štúdia zrážok Pb-Pb pri energii 2,76 TeV na nukleón mnoho nových poznatkov o kvarkovo-gluónovej plazme. Veľké množstvo meraných údajov umožňuje detailné štúdium anizotropie rozpínania horúcej hmoty a kvantifikovanie jej transportných vlastností. Vysoká energia prvotných partón-partónových interakcií umožňuje pozorovať páry jetov, v ktorých jeden vykazuje priamo merateľnú stratu energie po prechode horúcou hmotou. To otvára bezprecedentné možnosti „tomografie“ kvarkovo-gluónovej plazmy. Tiež sme získali prístup k meraniu partónovej rozdeľovacej funkcie v doteraz nedosiahnuteľnej oblasti frakcií hybnosti. Veľmi presné merania z LHC sú prísny testom správnosti teoretických modelov navrhnutých na popis dynamiky horúcej jadrovej hmoty. Pri štúdiu zrážok Pb-Pb sa získali nové poznatky o závislosti jadrového faktoru a dvojvrchovej štruktúre, potlačení otvoreného charmu, čo prináša nový pohľad na vlastnosti QGP. V experimente ALICE sa štúdiom fotónov podarilo odmerať rekordnú teplotu QGP – vyše 300 MeV. Princípiálnou úlohou pre ALICE je preskúmanie vlastností fyzikálneho vákua.

V závere roka 2012, v januári a februári 2013 vykonali na LHC prvé experimenty na interakciách protón-olovo pri energii 5,02 TeV. Kolaborácia ALICE už opublikovala zaujímavé výsledky z tohto experimentu.

Výskum antihmoty a exotických jadier

Na Protónový synchrotrón a booster (PSB) je napojený veľmi významný program skúmania antihmoty. V zariadeniach ALPHA alebo ATRAP sa spomalené antiprotóny spoja s pozitronmi. Tak sa vytvoria atómy antivodíka, ktoré sa v CERN-e podarilo udržať rekordne dlhú dobu. Experimenty

doteraz potvrdili, že antivodík je s vysokou pravdepodobnosťou presným zrkadlovým obrazom vodíka, čo je veľmi dôležitým fyzikálnym výsledkom. Na ďalší výskum v tomto smere CERN buduje ešte výkonnejšie zariadenie ELENA.

Dôležitým výskumom v CERN-e je tiež štúdium exotických rádioaktívnych jadier v rámci programu ISOLDE.

Možno povedať, že bohatý program výskumu v CERN-e mu zaručuje postavenie svetového lídra v oblasti štúdia štruktúry hmoty na najbližšie desaťročia.

Štruktúra a organizácia CERN-u

V súčasnosti CERN združuje 20 európskych krajín. Laboratórium je majetkom členských krajín. Podľa štatútu členské štáty prispievajú do rozpočtu organizácie, ktorý je ročne vyše 1,1 miliardy švajčiarskych frankov, v pomere svojich národných dôchodkov. Najvyšším orgánom je Rada CERN, v ktorej má každá krajina dvoch predstaviteľov (politického a vedeckého delegáta). Prezident a viceprezidenti Rady sú volení Radou na jeden rok, s možnosťou predĺženia maximálne na tri roky. Generálny riaditeľ CERN-u je volený Radou na 5 rokov. Následne si vyberá riaditeľov pre vedu, pre urýchľovače a pre administratívu. CERN má 8 oddelení na čele s riaditeľmi. Rada má dva pomocné výbory: vedecký (SPC) a finančný (FC). Poradným orgánom Rady je aj Európsky výbor pre budúce urýchľovače (ECFA). Všetkých funkcionárov CERN-u schvaľuje Rada. V poslednom desaťročí má najväčší vplyv na riadenie CERN-u prezidentská skupina (obr. 1.6), ktorá pripravuje program aj návrh uznesení pre Radu CERN.



Obr. 1.6 Prezidentská skupina CERN v roku 2010, zľava: predseda finančného výboru Martin Steinacher (Švajčiarsko), viceprezident Dan-Olof Riska (Fínsko), predseda vedeckého výboru Enrique Fernandez (Španielsko), prezident Michel Spiro (Francúzsko), generálny riaditeľ Rolf-Dieter Heuer (Nemecko), vedecký tajomník Steinar Stapnes (Nórsko), viceprezident Branislav Sitár (Slovensko)

Každá členská krajina má v Rade CERN jeden hlas bez ohľadu na veľkosť príspevku krajiny do rozpočtu CERN-u. Na práci a financovaní CERN-u sa podieľajú aj pridružené krajiny (napr. USA, Japonsko, Rusko, Kanada, India, atď.). V roku 2010 Rada schválila dokumenty o rozšírení, čím sa CERN stal svetovým laboratóriom. Kandidátmi na plné členstvo v CERN-e sú Rumunsko (od 2010), Izrael (od 2011) a Srbsko (od 2012). Prihlášky podali tiež Slovinsko, Turecko a Cyprus. Záujem o asociované členstvo v CERN-e prejavili: Brazília, India, Kanada, Austrália, Rusko, Ukrajina, Pakistan a ďalší.

Audit efektívnosti vedeckej činnosti v CERN-e ukázal, že efektívnosť CERN-u je vo väčšine parametrov vyššia ako v iných špičkových svetových laboratóriách. Napríklad v roku 2012 CERN publikoval vyše 300 článkov v prestížnych časopisoch a vyše 1 600 príspevkov na vedeckých konferenciách.

CERN na základe zmluvného vzťahu úzko spolupracuje s Európskou komisiou. CERN, ako jediná vedecká organizácia, sa stal pozorovateľom v OSN.

Vzdelávacia úloha CERN-u

CERN sa významne zapája do vzdelávania študentov a mladých fyzikov. Každoročne sa v lete vzdeláva v CERN-e mnoho študentov z celého sveta v rámci „letnej školy CERN“. V CERN-e sa školia doktorandi na všetkých experimentoch. Po skončení PhD štúdia môžu mladí fyzici alebo technici dostať v CERN-e niekoľkoročné štipendium. Organizácia je tiež najväčším používateľom grantov Marie Currie financovaných Európskou úniou.

CERN organizuje aj školenia učiteľov fyziky. Cieľom programu pre zhruba 1000 učiteľov ročne (vrátane slovenských) je získanie a prehĺbenie poznatkov z fyziky elementárnych častíc, kozmológie a ďalších oblastí súvisiacich s výskumom Organizácie prostredníctvom autentických stretnutí s vedcami, ktorí tam pracujú, ako aj návštev pracovísk a laboratórií a ďalších vzdelávacích aktivít.

World LHC Computing Grid (WLCG)

Spracovanie a analýza obrovského množstva dát z detektorov na LHC vyžaduje celkom nové metódy. V CERN-e sa od roku 2000 začal pripravovať a od roku 2008 úspešne funguje projekt WLCG, ktorým sa v hierarchickej štruktúre paralelne pracujúcich počítačových klastrov (fariem) dáta ukladajú a spracúvajú. WLCG je najväčšia vedecká sieť počítačov na svete rozmiestnená v 170 počítačových centrách v 36 štátoch spojených do jednej virtuálnej organizácie. Na analýze experimentálnych

údajov podieľa viac než 11 000 fyzikov z vedeckých ústavov a univerzít po celom svete. Úlohou WLCG je uložiť distribuovať a spracovať enormné množstvo dát produkovaných experimentmi, ktoré predstavuje ročne 25 Petabajtov (25 miliónov Gigabajtov). WLCG zjednotila výpočtové centrá do jednej virtuálnej organizácie, ktorá poskytuje dostatočnú výpočtovú kapacitu na analýzu dát produkovaných experimentmi v rámci LHC.

Architektúra WLCG je striktne hierarchická, vyššie úrovne (TIER) poskytujú dáta nižším pomocou vysokokapacitných spojení. TIER0, najvyššia vrstva hierarchie je inštalovaná v CERN-e a čiastočne v Budapešti. Jej primárnou úlohou je uchovať dáta produkované experimentmi. Spolu s 13 centrami úrovne TIER1 má za úlohu zabezpečiť kalibráciu a primárnu rekonštrukciu dát. Spoločnou charakteristikou týchto vrstiev je vysoká kapacita pamäťových médií. Vrstvy TIER2 charakteristické pre krajiny alebo ústavné centrá sú určené predovšetkým na fyzikálnu analýzu takto predpripravených údajov a na produkciu Monte-Carlo simulácií. WLCG pracuje výborne. Do konca roku 2012 sa archivovalo vyše 106 PB informácií s rekordom 4,6 PB za týždeň. Experimenty na LHC budú produkovať stále viac dát, preto je nevyhnutné WLCG ďalej budovať a zväčšovať.

Európska stratégia časticovej fyziky

Rada CERN na špeciálnom zasadnutí v Lisabone 14.–15.7. 2006 schválila Európsku stratégiu časticovej fyziky. Podľa dohody s Európskou komisiou je CERN zodpovedný za koordináciu časticovej fyziky v Európe.

Hlavné aspekty Európskej stratégie pre časticovú fyziku:

1. Európa si má zachovať a upevniť centrálnu pozíciu v časticovej fyzike.
2. Je potrebné koordinovať európske aktivity v oblasti časticovej fyziky.
3. Dobudovanie a úspešná prevádzka LHC.
4. Podpora vývoja nových urýchľovačov s perspektívou vybudovania lineárneho urýchľovača CLIC a tiež intenzívneho zdroja neutrín.
5. Podpora európskeho programu výskumu neutrín.
6. Spolupráca s komunitou astročasticovej fyziky (ApPEC) na stratégii rozvoja časticovej a astročasticovej fyziky v experimentoch mimo urýchľovačov.
7. Spolupráca s národnými európskymi laboratóriami na rozvoji fyziky nižších a stredných energií.
8. Podpora a rozvoj teoretického výskumu v CERN-e.

9. Podpora a rozvoj transferu a využitia technologických poznatkov do členských štátov CERN.
10. Podpora a rozširovanie úzkej spolupráce s priemyslom členských krajín na prospech oboch strán.

Európska stratégia je živý dokument, ktorý je aktualizovaný podľa potrieb rozvoja danej vednej oblasti. Prvá „Aktualizácia európskej stratégie časticovej fyziky“ bola slávnostne schválená na špeciálnom zasadnutí Rady 29.–30. mája 2013 v Bruseli, za prítomnosti ministrov členských krajín CERN-u.

Aplikácie

CERN sa podieľa na vývoji mnohých aplikácií pre prax. Najznámejší je napríklad vývoj aplikácie World Wide Web (www) v roku 1989 fyzikom Timothy Berners-Lee v CERN-e. Za výrazného príspevku fyzikov z CERN-u bola vyvinutá gama kamera, používaná v mnohých nemocniciach. V posledných rokoch sa pracovalo hlavne na programe aplikácií urýchľovačov v medicínskej praxi

a na použití solárnych panelov nového typu vyvinutých v CERN-e na výrobu elektrickej energie.

Prenos technológií

Všetky vynálezy a technologické postupy, ktoré sa uskutočnia v CERN-e sú majetkom členských štátov. CERN podporuje a organizuje prenos a zavádzanie špičkových technológií v členských krajinách. Všetky technológie poskytuje CERN členským krajinám zadarmo. V roku 2102 sa počet technologických transferov do členských štátov výrazne zvýšil (na 60).

Popularizácia výsledkov

CERN je vo svete veľmi populárny. V roku 2012 laboratórium navštívilo 85 000 ľudí, ktorí si väčšinou pozreli stálu výstavu v „Globe of Science and Innovation“. Oznámenie o objave Higgsovho bozónu na LHC sledovalo 4. 7. 2012 na televíznych obrazovkách okolo miliardy ľudí, čo je porovnateľné len s Olympijskými hrami.

2 História fyziky vysokých energií pred vstupom SR do CERN-u

Počiatky fyziky na vysokých školách a vo výskume na Slovensku

- 1919 Komenského univerzita v Bratislave, fyzika sa vyučovala len pre študentov medicíny.
- 1939 Založenie Slovenskej Technickej Univerzity v Bratislave, vyučovanie matematiky a fyziky pre inžinierov. Vynikajúci učitelia matematiky ako profesor Štefan Schwarz a fyziky ako profesor Dionýz Ilkovič.
- 1950 a neskôr – otvára sa možnosť študovať fyziku ako špecializáciu na nedávno zriadenej Prírodovedeckej fakulte Univerzity Komenského v Bratislave.
- 1950 a neskôr – začiatky prednášok z modernej fyziky na Prírodovedeckej fakulte Univerzity Komenského. Kvantovú mechaniku spočiatku prednášal profesor Václav Votruba, ktorý cestoval pravidelne z Prahy do Bratislavy. Mladý študent z Bratislavy Milan Petráš sa stal doktorandom profesora Votrubu v Prahe a po návrate do Bratislavy založil seminár z teoretickej fyziky, ktorý sa pravidelne stretáva v utorok poobede od roku 1961 podnes. Skupiny pracujúce v matematickej fyzike a vo fenomenológii časticovej fyziky sa vyvinuli z aktivít tohto seminára.

- 1950 a neskôr. Experimentálne štúdium kozmických lúčov v Prahe. Detektory boli umiestnené na najvyššom možnom mieste vo vtedajšom Československu, na Lomnickom štíte, 2 632 m, vo Vysokých Tatrách. Toto vytvorilo dobré podmienky pre stimulovanie štúdií kozmického žiarenia na Technickej univerzite a na Ústave experimentálnej fyziky Slovenskej akadémie vied (SAV) v Košiciach.
- 1952 Založenie Technickej Univerzity v Košiciach. Začiatky fyzikálneho výskumu v magnetizme a v oblasti kozmického žiarenia.
- 1956 Československo sa stáva členským štátom Spojeného ústavu jadrových výskumov (SÚJV) v Dubne v Sovietskom Zväze.
- 1959 Založenie Univerzity Pavla Jozefa Šafárika (UPJŠ) v Košiciach. Prednášky a výskum vo fyzike započaté v roku 1963, keď bola založená Prírodovedecká fakulta.
- 1963 Založenie Fyzikálneho ústavu Slovenskej akadémie vied v Bratislave (predtým existoval Kabinet fyziky v roku 1957 premenovaný a na Laboratórium fyziky).
- 1964 Vytvorenie pobočky Fyzikálneho ústavu SAV v Košiciach. Na jej základe v roku 1969 vznikol Ústav Experimentálnej fyziky (ÚEF) SAV v Košiciach.

Fyzika vysokých energií na Slovensku od 60. rokov po prijatie Slovenska do CERN-u

Výskum v oblasti fyziky vysokých energií v 60. rokoch uskutočňovali na Slovensku nasledujúce pracoviská:

- Katedra teoretickej fyziky na Univerzite Komenského v Bratislave,
- Oddelenie teoretickej fyziky na Fyzikálnom ústave SAV v Bratislave,
- Katedra jadrovej fyziky na UK v Bratislave,
- Katedra jadrovej fyziky na UPJŠ v Košiciach,
- Oddelenie fyziky vysokých energií na Ústave experimentálnej fyziky SAV v Košiciach

V Bratislave aj v Košiciach existovala veľmi dobrá spolupráca tímov pracujúcich v oblasti jadrovej fyziky a fyziky vysokých energií. Pracovníci Katedry jadrovej fyziky MFF UK sa pôvodne zaoberali najmä otázkami merania a analýzy nízkych rádioaktivít ale postupne rástla skupina zaoberajúca sa fyzikou vysokých energií, spolupracujúca úspešne s SÚJV v Dubne. O práci teoretických skupín a o počiatkoch neformálnej spolupráce v teoretickej fyzike vysokých energií sa píše podrobnejšie v kapitole 12.

Skupina teoretikov v Bratislave

V polovici 60. rokov sa zlepšili podmienky pre zahraničné styky s fyzikmi v západnej Európe a v USA. Prvé styky sa uskutočnili na konferenciách so zahraničnou účasťou. Príkladom boli konferencie na Balatone, ktoré organizoval George Marx. Prednášali na nich viacerí vynikajúci fyzici zo západu aj z východu. Na konferencii na Balatone v roku 1965 sa stretli niekoľkí fyzici z vtedajšieho Československa s fyzikmi z CERN-u, vrátane Mauricea Jacoba, Mattsa Roosa, Roberta Socolowa a Johna Harta.

Z iniciatívy Waltra Thirringa z Viedenskej univerzity bola zahájená spolupráca medzi teoretickými fyzikmi z Viedne, Budapešti a Bratislavy, spočívajúca najmä v návštevách odborných seminárov na týchto pracoviskách. Táto spolupráca bola zárodkom neskoršej intenzívnejšej takzvanej Trianglovej spolupráce. Na jar v roku 1968 sa uskutočnili neformálne diskusie o možnej účasti Československa v CERN-e. Rozhovory boli ale skoro prerušené kvôli dramatickým politickým zmenám v Československu.

Koncom 60. a v 70. rokoch malo viacero mladších fyzikov z teoretickej skupiny v Bratislave možnosť prísť na stáž na niekoľko mesiacov

až na rok do CERN-u. Podobne to bolo aj v Poľsku a Maďarsku. Z Bratislavy túto možnosť postupne využili Ján Pišút, Peter Lichard, Vladimír Černý a Štefan Olejník. Na niekoľkotýždňových pobytoch v CERN-e bol Branislav Sitár v roku 1975 na g-2 experimente na ISR a v roku 1981 na Európskom Hybridnom Spektrometri.

Toto malo veľmi pozitívny vplyv na rozvoj časticovej fyziky v Československu a v ďalších východných krajinách. V dlhších časových škálach presadzovali priateľskú politiku CERN-u voči fyzikom z východných krajín ľudia ako generálny riaditeľ CERN-u Victor Weisskopf a profesori Jacques Prentki, Walter Thirring, Maurice Jacob a ďalší ako riaditelia Theory Division v CERN-e.

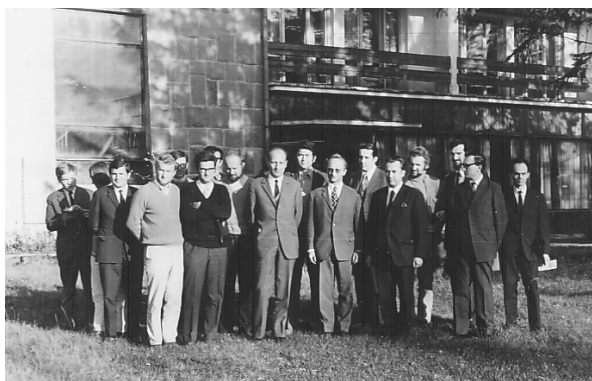
Počet ľudí v Bratislave, zaoberajúcich sa fenomenológiou vo fyzike vysokých energií v sedemdesiatych a osemdesiatych rokoch postupne rástol na súčasných okolo 10 pracovníkov. Ich pracoviskami bola Katedra teoretickej fyziky na Univerzite Komenského a Fyzikálny ústav Slovenskej Akadémie Vied. Niektorí ľudia prešli z časticovej fyziky na matematickú fyziku, iní na teóriu tuhých látok alebo počítačovú fyziku, iní sa stali súčasťou experimentálnych skupín, najmä v CERN-e.

Niektoré témy, na ktorých sa pracovalo vo fenomenológii fyziky vysokých energií:

- Mnohočasticová produkcia v zrážkach hadrónov, spektrá častíc v rapidite a v priečnej hybnosti,
- Produkcia leptónov a fotónov v hadrónových a jadrových zrážkach,
- Analýza formfaktorov hadrónov,
- Prúdová algebra a Chirálna poruchová teória,
- Výpočty parametrov QCD na mriežach, analýzy vlastností základného stavu QCD,
- Potlačenie produkcie častice J/ψ v zrážkach ťažkých iónov,

Vplyv kontaktov s CERN-om v období 1965 – 1992

Kontakty s CERN-om zohrali veľmi dôležitú úlohu v kvalitatívnych faktoroch, ktoré sú veľmi dôležité, ako: Ktoré sú dôležité otázky pre podrobnejšie štúdium? Má sa pracovná skupina zaoberať témami v „hlavnom prúde“ alebo sa skôr sústrediť na svoje špecifické témy? Má sa starať o spoluprácu s experimentálnymi skupinami? Koľko námahy má investovať do organizácie stretnutí, seminárov a konferencií? Praktické odpovede na takéto otázky určujú istú „kultúru“ pracovnej skupiny a kontakty s CERN-om pomáhali nájsť odpovede na takéto a podobné otázky.



Obr. 2.1 Hadron Structure 1972, Pezinská Baba, vpredu zľava M. Noga, J. Pišút, M. Petráš, W. Thirring a V. Šimák

V 70. rokoch skupiny z Viedne, Budapešti a Bratislavy organizovali viacero spoločných stretnutí a seminárov. Seminára organizované skupinou v Bratislave sa postupne sústredili na usporiadanie každoročných jesenných konferencií „Hadron Structure“ (obr. 2.1). Spočiatku sa uskutočňovali v Kongresovom centre SAV v Smoleniciach (obr. 2.2), neskôr sa konali aj v iných miestach. Na týchto konferenciách sa stretávali nielen fyzici z krajín strednej Európy, ale aj zo západnej Európy, vrátane CERN-u, z USA a zo Sovietskeho zväzu. Pre mnohých sovietskych fyzikov bolo Československo najzápadnejším miestom, na ktoré im dovolili vycestovať. Pre viacerých sovietskych fyzikov boli konferencie Hadron Structure miestom, kde sa stretávali s kolegami z USA a zo západnej Európy.



Obr. 2.2 Hadron Structure 1974, Smolenice, zľava Milan Noga, Ján Pišút, Nevenka Pišútová

Na týchto konferenciách prednášali mnohí fyzici z členských krajín CERN-u, spomeňme aspoň mená ako J. S. Bell, A. Di Giacomo, H. Leutwyler, R. Dalitz a M. Roos, ale napríklad aj H. D. Politzer, neskorší laureát Nobelovej ceny (obr. 2.3). Pri neformálnych stretnutiach počas konferencií sme sa, často úspešne, snažili dohodnúť dlhšie študijné pobyty našich doktorandov a postdoktorandov na dobrých zahraničných pracoviskách. V 80. rokoch skupina v Bratislave nadviazala veľmi dobré kontakty s experimentálnymi skupinami ako AFS a NA34 v CERN-e.



Obr. 2.3 Hadron Structure 1980, Smolenice, H. D. Politzer, neskorší laureát Nobelovej ceny

Fyzika vysokých energií v SÚJV Dubna

Experimenty s bublinovými komorami SÚJV

Skupina fyzikov na ÚPJŠ a ÚEF SAV v Košiciach sa koncom šesťdesiatych rokov minulého storočia orientovala na metodiku bublinových komôr s cieľom vybudovať v Košiciach laboratórium na spracovanie informácie zo snímok z klasických bublinových komôr. Nositeľom tejto tematiky bol Jiří Patočka, ktorý po viacročnej praxi v SÚJV prichádza v roku 1967 na Prírodovedeckú fakultu do Košíc.

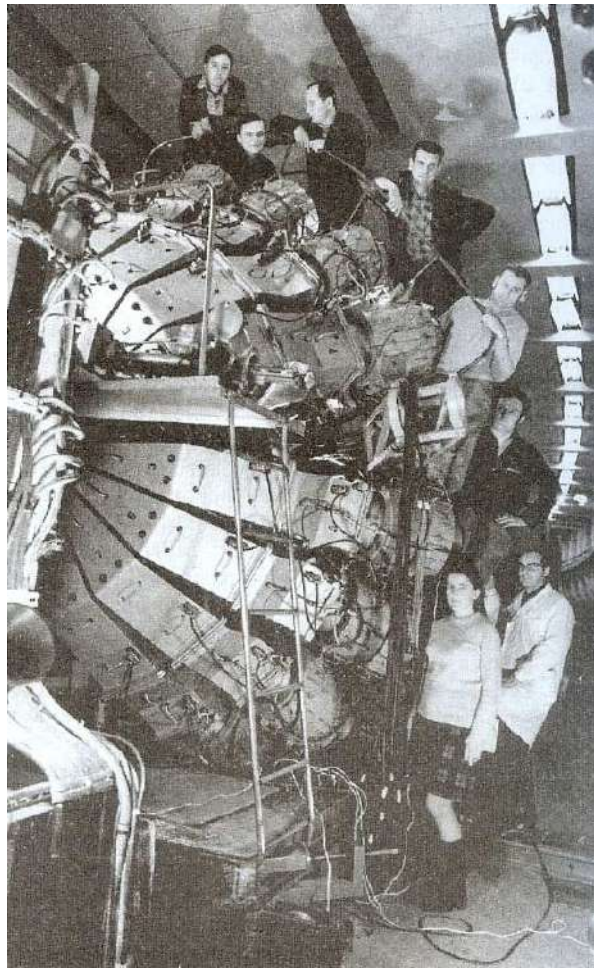
Prvým komorovým experimentom, na ktorý sa skupina orientovala, bolo štúdium π^-p a π^-C interakcií pri energii 5 GeV s produkciou neutrálnych častíc (γ -kvantá s konverziou na e^+e^- , podivné častice s V^0 rozpadom) na snímkach z jednometrovej propánovej bublinovej komory Laboratória jadrových problémov SÚJV (vedúci experimentov V. P. Dželepov a J. A. Budagov). Dubnianska skupina podporila začiatky budovania laboratória v Košiciach dvoma prehladávacími stolmi a dvoma digitalizovanými mikroskopmi na meranie parametrov dráh častíc na snímkach. Na tejto tematike pracovali od roku 1967, najmä počas dlhodobých pracovných pobytov v Dubne; Jiří Patočka, Gabriela Martinská, Ladislav Šándor, Jaroslav Antoš a Štefan Valkár. Medzi hlavné výsledky patrí zmeranie účinných prierezov exkluzívnych kanálov π^-p interakcie s násobnou produkciou π^0 mezónov, pozorovanie škálovej invariantnosti v inkluzívnom spektre γ -kvánt.

Paralelne s tým sa košická skupina zúčastnila aj na experimente s jednometrovou vodíkovou komorou Laboratória vysokých energií (LVE) SÚJV (vedúci R.M. Lebedev). Tá bola tiež ožiarená vo zväzku π^- mezónov s energiou 5 GeV a študovali sa exkluzívne a semi-inkluzívne π^-p interakcie. Z Košíc na tomto výskume participovali Jiří Patočka, Jiří Michalčák a Júlia Hlaváčová z Katedry jadrovej fyziky UPJŠ.

Košickí fyzici sa zúčastnili aj na experimentoch s dvojmetrovou vodíkovou bublinovou komorou LUDMILA LVE (vedúci I. M. Gramenickij). Tá pracovala v Ústave fyziky vysokých energií (ÚFVE) v Serpuchove vo zväzku antiprotónov s energiou 22,4 GeV a neskôr aj v unikátnom zväzku antideutérónov s energiou 12,2 GeV. Študovali sa charakteristiky antiprotón-protónových a antideutérón-deutérónových zrážok. Pri ožiarení antideutérónmi bola komora doplnená deutériovým dráhovo-citlivým terčikom (priehľadná komôrka naplnená tekutým deutériom). Experimentálny materiál, získaný vo zväzku antideutérónov, poskytol okrem iného aj unikátnu možnosť po prvý raz študovať zrážky antineutrónov s neutrónmi. Na experimentoch participovali Jiří Patočka, Gabriela Martinská, Pavol Murín a Dušan Bruncko.

Paralelne s prácou na spomenutých experimentoch, spojenou s prácnym prehľadávaním a ručným meraním snímok, sa pracovalo v prvej polovici sedemdesiatych rokov minulého storočia na košických pracoviskách na vývoji automatizovaného systému na komplexné spracovanie informácie zo snímok z bublinových komôr. Vedúcim tohto ambiciózneho projektu bol Michal Seman z ÚEF SAV. Systém bol postavený na základe dvoch prehľadávacích zariadení, vyrobených v dielňach Katedry jadrovej fyziky na základe dokumentácie s Fyzikálneho ústavu (FZÚ) ČSAV v Prahe a dvoch meracích zariadení SAMET, vyvinutých a vyrobených vo FZÚ. Tie ale predpokladali ručné meranie a preto boli podstatne modifikované a doplnené náročnou mechanikou a elektronikou potrebnou pre automatizáciu procesu merania. Merací systém bol riadený na tú dobu výkonným 16-bitovým minipočítačom NOVA-820 (výrobok firmy Data General v USA). Počítačom bolo riadené nielen meranie, ale celá logistika reťazca spracovania snímok z bublinových komôr. Hardvérovú časť systému realizovali Michal Seman, Jozef Špalek a Miroslav Javorek, potrebný softvér napísali Michal Seman, Jaroslav Bán, Mikuláš Bánó a Ladislav Šándor. Na implementácii offline softvéru pre geometrickú a kinematickú rekonštrukciu interakcií (systém HYDRA z CERN-u) pracovali Endre Futó, Vojtech Novitzky a Alexander Dirner.

Systém bol úspešne dokončený v roku 1977 a bol využitý v experimentoch s už spomenutou jednometrovou vodíkovou komorou LVE SÚJV, ožarovanou postupne zväzkami relativistických ľahkých jadier (deutéróny, jadrá ^3He , ^4He , ^{16}O , polarizované deutéróny). Išlo o jediný automatizovaný systém na spracovanie komorových snímok v Československu a jeho výkonnosť bola niekoľko desaťtisíc prípadov interakcie ročne. To umožnilo košickej skupine rovnocennú spoluprácu aj s takým veľkým ústavom, akým je SÚJV.



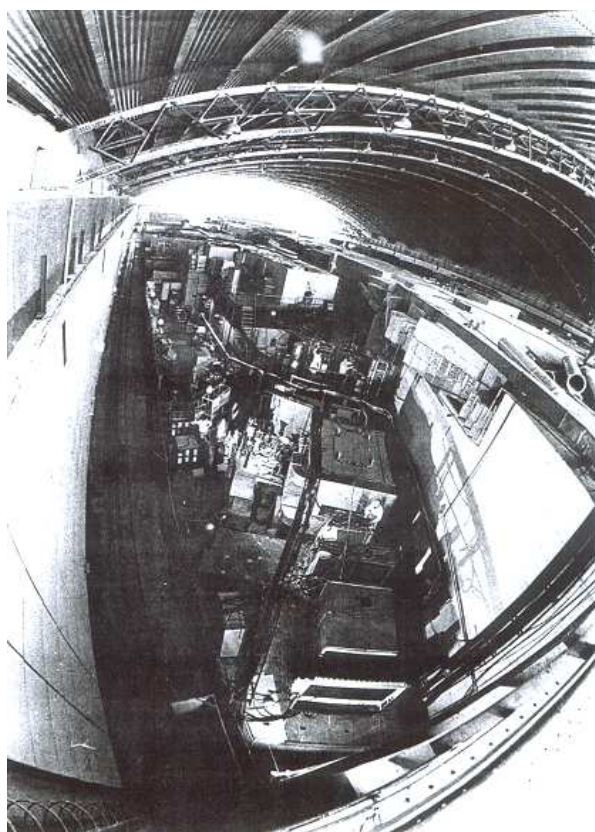
Obr. 2.4 Hlavná časť aparatury experimentu „Hľadanie Diracovho monopólu“ v ÚFVE Serpuchov (zdola: Euba Kollárová, V. P. Zrelov, Peter Pavlovič, Rudolf Janik, Dušan Kollár...)

Štúdium interakcií relativistických ľahkých jadier s protónmi na snímkach z jednometrovej vodíkovej komory SÚJV (vedúci experimentov V. V. Glagolev) patrilo k nosným témam košických pracovísk vo fyzike vysokých energií po dobu cca 10 rokov, až do začiatku spolupráce s DESY Hamburg v experimente H1 na urýchľovacom komplexe HERA a tiež začiatku postupne sa rozvíjajúcej spolupráce s CERN-om. Z hlavných výsledkov treba spomenúť najmä pozorovanie prejavov vzniku dibaryónov, štúdium mechanizmu

interakcie ľahkých jadier s protónmi a ďalšie. Na experimentoch sa postupne podieľali Gabriela Martinská, Jiří Patočka a Jozef Urbán z UPJŠ, Mikuláš Bánó, Blahoslav Pastirčák, Michal Seman a Ladislav Šándor z ÚEF SAV, ako aj Júlia Hlaváčová a Mária Kravčíková z Technickej univerzity v Košiciach.

Experimenty Diracov monopol a MIS

V šesťdesiatych a sedemdesiatych rokoch pracovala v SÚJV v Dubne aj experimentálna skupina z MFF UK z Bratislavy. Boli v nej Peter Pavlovič, Pavol Šulek, Rudolf Janík, Ľuba Kollárová, Dušan Kollár, Ján Ružička a ďalší. Skupina sa podieľala na experimente, v ktorom sa hľadal Diracov monopol na urýchľovači s energiou 70 GeV v Ústave fyziky vysokých energií (ÚFVE) v Serpuchove (obr. 2.4). Niektorí slovenskí fyzici a inžinieri (J. Ružička, R. Janík) neskôr prešli na experiment Magnetický Iskrový Spektrometer (MIS) vedený A. Tapkinom.



Obr. 2.5 Experiment HYPERÓN v ÚFVE Serpuchov 1977–1989

Experiment HYPERÓN

Iná slovenská skupina, v ktorej boli 10 a viac rokov Branislav Sitár, Stanislav Tokár, Vladimír Hlinka, Peter Strmeň z MFF UK Bratislava, Michal Seman, Jaroslav Antoň, Ladislav Šándor, Jozef Špalek a Eduard Kladiwa z ÚEF SAV v Košiciach,

pracovala v SÚJV na experimente HYPERÓN. Spektrometer HYPERÓN pracoval na urýchľovači ÚFVE v Serpuchove na neseparovanom zväzku kladne nabitých častíc (π^+ , K^+ , p) s energiou 8–12 GeV. Realizovali sa na ňom experimenty v oblasti hadrónovej fyziky. Medzi najdôležitejšie výsledky dosiahnuté v experimente HYPERÓN patria: štúdium procesov s výmenou hypernáboja, meranie výťažkov produkcie η -mezónov, štúdium inkluzívnej produkcie $K^{0*}(892)$ mezónov, meranie vektorových formfaktorov v rozpadoch $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+$ a ďalšie.

Experiment ARES

Bol zameraný štúdium vzácných a zakázaných rozpadov piónov a miónov (1982–1994). ARES bol mnohoúčelový cylindrický spektrometer pozostávajúci z 13 proporcionálnych komôr, umiestnený na π mezónovom zväzku dubnenského fázotrónu. Účasť slovenských fyzikov (J. Vanko 1982–1990, J. Szarka, P. Povinec – krátkodobu) na projekte mala dve etapy: v prvej participovali na realizácii spektrometra, na kalibračných a metodických meraniach, v druhej sa zúčastnili experimentov, v ktorých sa hľadal rozpad miónu na 3 elektróny (zakázaný zákonom zachovania leptónového náboja) a určoval sa vetviaci pomer vzácného rozpadu $\pi \rightarrow 3e\nu$. Získané výsledky sú dodnes druhé najlepšie na svete a sú stále citované v Review of Particle Properties.

Experiment RISK

Základným detektorom spektrometra RISK bola veľká streamerová komora s pracovným objemom $4,7 \times 0,9 \times 0,8 \text{ m}^3$. Experimenty boli realizované v osemdesiatych rokoch minulého storočia pod vedením V.I. Petruchina v ÚFVE v Serpuchove. Študovali sa zrážky π^- mezónov s jadrovými terčikmi pri energii 38 GeV. Fyzikálny program bol zameraný na analýzu produkcie dimiónov a častíc s veľkou priečnou zložkou hybnosti. Na experimentoch z Košíc participovali Karel Šafařík a Ivan Králik.

Kanálovanie a zahýbanie vysokoenergetických protónov v monokryštáloch.

Na sovietsko-americkom experimente v Laboratóriu vysokých energií (LVE) v SÚJV, ktorý priviedol k objavu kanálovania a zahýbania vysokoenergetických protónov v monokryštáloch, sa v rokoch 1978–1979 zúčastnil B. Sitár. Novovynutá metóda umožňuje zahýbanie vysokoenergetických zväzkov častíc na veľmi malom polomere v magnetických poliach ohnutého kryštálu prevyšujúcich 100 Tesla. Táto pionierska práca je vysoko citovaná.

Fotoemulzné experimenty

Fyzici z UPJŠ v Košiciach skúmali zrážky relativistických jadier urýchlených na synchrotróne SÚJV, na urýchľovačoch ÚFVE v Serpuchove, CERN-e i inde s jadrami fotoemulzie. Išlo o dlhoročný program výskumu, ktorého iniciátorom bol Josef Tuček, pôsobiaci na Prírodovedeckej fakulte UPJŠ v šesťdesiatych rokoch minulého storočia. V ďalších rokoch k týmto výskumom prispeli Mariana Karabová, Stanislav Vokál, Jaroslav Karaba, Adela Kravčáková, Emanuel Síleš, Magdaléna Tóthová a Janka Vrláková.

Experiment H1 na urýchľovacom komplexe HERA v DESY

Ústav experimentálnej fyziky SAV v Košiciach sa zúčastňoval aj na experimente H1 na urýchľovacom komplexe HERA (elektrón-protónový zrážač) v laboratóriu DESY (Deutsches Elektronen Synchrotron) v Hamburgu. Oddelenie subjadrovej fyziky (OSF) ÚEF SAV vstúpilo do experimentu H1 v roku 1987, a to spolu s dvomi pražskými pracoviskami – FÚ AV ČR a MFF UK. Hlavným hardvérovým záväzkom československých skupín bola výroba (a testy) čítacích elektród pre hadrónovú časť kalorimetrického detektora H1, ktorý pracoval na báze kvapalného argónu, a ktorý v tom čase predstavoval „srdce“ detektora H1 (tento kalorimeter bol svojho času najväčším detektorom svojho typu na svete).

Skupina OSF si vzala, popri výrobe už zmienených elektród, na seba aj návrh, testy, výrobu a údržbu rozhodovacieho systému (triggera) na výber finálnych elektrónov pomocou scintilačného kalorimetra BEMC, ktorý bol súčasťou detektora H1. Významne prispela k vývoju rekonštrukčného softvéru pre údaje z BEMC (a neskôr detektora SPACAL), a v konečnom dôsledku aj k fyzikálnej analýze späté s touto oblasťou (štruktúrne funkcie protónu pre malé hodnoty Bjorkenovho x).

Členmi experimentu H1 z ÚEF SAV boli Jaroslav Antoš, Michal Seman (prvé roky), Jaroslav Bán, Dušan Bruncko, Jozef Ferencei, Pavol Murín, Tibor Kurča, Filip Tomasz, Jozef Špalek, František Kriván a Richard Maráček.

Účasť na experimentoch vo FNAL

Prvé kontakty s Fermi National Accelerator Laboratory (FNAL) v Batavii v USA sa začali v roku 1990, kedy sa do experimentu E771 dostal Stanislav Tokár, pracujúci v tom čase v SÚJV Dubna. V roku 1991 bol S. Tokár pozvaný do FNAL pracovať na experimente E771. Zaoberal sa rekonštrukciou miónov ako aj modelovaním detektora

E771. Bol to experiment s pevným terčom ($800 \text{ GeV}/c$, p-Si), ktorý sa zameriaval na fyziku ťažkých kvarkov – b a c . Experiment, ktorý naberal dáta v rokoch 1991–92, dosiahol významné výsledky predovšetkým v oblasti fyziky pôvabných častíc. Poslúžil tiež na získanie kontaktov, ktoré boli neskôr zúročené účasťou fyzikov z Univerzity Komenského v Bratislave a z Ústavu experimentálnej fyziky SAV v experimente CDF.

Začiatky systematickejších kontaktov slovenských fyzikov s CERN-om

Jednou z užitočných foriem spolupráce medzi CERN-om a SÚJV bolo organizovanie (s dvojročným intervalom) spoločných letných škôl pre mladých fyzikov. V roku 1983 takáto škola bola v Tábore v južných Čechách. Hlavným organizátorom bol Vladislav Šimák z Fyzikálneho ústavu ČSAV v Prahe. Na škole bol aj vtedajší generálny riaditeľ (DG) CERN-u Herwig Schopper, rodák z Lanškrouna na Morave. Počas pobytu na škole spolu s manželkou navštívil svoje rodisko a pri pracovných stretnutiach s predstaviteľmi československých pracovísk fyziky vysokých energií inicioval nadviazanie priamych kontaktov a spolupráce Československa s CERN-om. Vtedajšie ústredné politické orgány takejto spolupráci nepriali, ale na Slovensku sme vďaka vtedajšiemu predsedovi SAV Vladimírovi Hajkovi dostali tichú podporu pre nadviazanie priamych kontaktov s CERN-om.

Skupina fyzikov z ÚEF SAV po predbežných diskusióch s Christianom Fabjanom začala neformálne kontakty a spoluprácu na experimente NA34 (HELIOS), ktorý viedol William J. Willis. Postupne sa podarilo Michalovi Semanovi (v roku 1984), Ladislavovi Šándorovi (1987) a Jaroslavovi Antošovi (1989) vycestovať do CERN-u na ročné pracovné pobyty v skupine HELIOS. Podrobnejšie o tom píšeme v kapitole 8.

Ústretový a priateľský postoj DG CERN-u Herwiga Schoppera a Christiana Fabjana k spolupráci fyzikov z bývalého Československa so skupinami v CERN-e sa prejavil veľmi pozitívne na kvalite práce našich fyzikov a v istom zmysle pripravil pôdu pre prijatie Československa a neskôr Slovenska do CERN-u. Podobný postoj prejavili aj vedúce osobnosti CERN-u v oblasti teórie (pozri kapitola 12).

Po zmene politických pomerov koncom roku 1989 CERN veľkoryso poskytol mimoriadnu kvótu ročných pobytov (fellowship) pre mladých odborníkov z bývalých socialistických krajín. Zo Slovenska takéto pobyty s úžitkom absolvovali Ivan Králik, Peter Lichard ml. a Štefan Olejník.

Vstup do experimentu DELPHI v CERN-e

Spolupráca s experimentom DELPHI na LEP sa začala ešte pred vstupom Slovenska do CERN-u v roku 1990 v rámci spoločného Slovensko-Rakúskeho projektu East-West Cooperation Project. Skupina z MFF UK Bratislava nadviazala pod vedením Pavla Povinca tesnú spoluprácu s Ústavom fyziky vysokých energií (HEPHY) vo Viedni. Jadro skupiny tvorili Peter Kubinec, Ivan Mikulec, Peter Chochula a študenti Juraj Bracíník a Peter Rosinský. V roku 1993 sa skupina rozšírila o Branislava Sitára a Rudolfa Janíka a v roku 1995 bola Bratislavská skupina akceptovaná za člena kolaborácie DELPHI. Podrobnejšie je slovenská účasť v experimente DELPHI opísaná v kapitole 7.

Záverečné poznámky

Fyzikálny výskum na Slovensku začal až po skončení druhej svetovej vojny. Výskum vo fyzike vysokých energií až v 60. rokoch štúdiom kozmického žiarenia a kvantovej teórie poľa. Možnosti

kontaktov s fyzikou a fyzikmi v rozvinutých krajinách boli niekedy viac a niekedy menej komplikované, v závislosti od politickej situácie. Českí a slovenskí fyzici získali mnoho vďaka ústretovému a priateľskému postoju vrcholových predstaviteľov i jednotlivých fyzikov, ktorí podporovali spoluprácu CERN-u s fyzikmi a inštitúciami v strednej a východnej Európe v ťažkých rokoch studenej vojny a v období normalizácie.

Viaceri naši fyzici získali skúsenosti účasťou na experimentoch v SÚJV Dubna, v ÚFVE Serpuchov, H1 v DESY a vo Fermiho národnom laboratóriu. Vďaka kontaktom s CERN-om v období pred prijatím Slovenska za členskú krajinu CERN-u a skúsenosťami získanými pri práci v spomenutých laboratóriách boli slovenskí fyzici pripravení na prácu v CERN-e po prijatí Československa v roku 1992 a Slovenska v roku 1993 za členský štát CERN-u. Prítomnosť Slovenska v CERN-e po roku 1993 vytvorila podstatne priaznivejšie podmienky pre prácu slovenských fyzikov v oblasti fyziky vysokých energií.

3 Vstup Slovenskej republiky do CERN-u

Pred politickými zmenami v roku 1989 fyzici v Československu prakticky nemali možnosť priamej spolupráce a účasti na experimentoch v CERN-e, vtedajší režim to nepodporoval. Výskum v časticovej fyzike, v skromnejších podmienkach, sme mohli robiť len v rámci Spojeného ústavu jadrových výskumov v Dubne v Rusku. Preto hneď po uvoľnení politických pomerov sme sa snažili nadviazať spoluprácu s CERN-om. Popíšme tu v krátkosti cestu, ktorá začala v spoločnom štáte Čechov a Slovákov, aby nakoniec doviedla samostatné Slovensko pred dvadsiatimi rokmi ako plnoprávneho člena európskej rodiny do CERN-u.

Vstup Československa do CERN-u

V januári 1990 vznikla na pôde Rady ČSAV pre zahraničné styky v Prahe pod patronátom jej predsedu prof. Jiřího Niederleho Komisia pre spoluprácu Československa s CERN-om. Jej vznik, ako aj prípravu rámcovej dohody o spolupráci s CERN-om, podporilo ponovembrové prezídium ČSAV už na svojom prvom zasadnutí. Predsedom komisie bol pražský fyzik Vladislav Šimák, podpredsedom Ladislav Šándor z Ústavu experimentálnej fyziky SAV v Košiciach. Zo Slovenska medzi členmi boli Štefan Olejník z Fyzikálneho ústavu SAV a Peter Lichard z Univerzity Komenského.

Prvá oficiálna československá delegácia navštívila CERN v dňoch 26.–27. marca 1990. Viedol ju prof. Armin Delong, dlhoročný riaditeľ Ústavu prístrojovej techniky ČSAV v Brne, ktorý v tej dobe bol podpredsedom federálnej vlády a aj podpredsedom ČSAV. Členmi delegácie boli P. Lichard, J. Niederle, L. Šándor a V. Šimák. Počas pobytu delegácie v CERN-e bola podpísaná rámcová dohoda o spolupráci medzi CERN-om a ČSAV, otvorená pre spoluprácu všetkých, nielen akademických, fyzikálnych pracovísk. V neformálnej diskusii s generálnym riaditeľom CERN-u prof. Carlom Rubbiom z jeho úst po prvý raz odzneli slová o tom, že by sa Československo mohlo uchádzať o plné členstvo v CERN-e za mimoriadne výhodných podmienok, začínajúc platením symbolického členského príspevku na úrovni cca 1,3 milióna CHF ročne s postupným nárastom na jeho nominálnu hodnotu. V ďalších mesiacoch sa o tejto možnosti intenzívne diskutovalo, uskutočnilo sa stretnutie československej komunity fyziky vysokých energií, návšteva poradcu generálneho riaditeľa CERN-u Owena Locka v Prahe, úspešné rokovania o možnom členstve v CERN-e na federálnom ministerstve zahraničných vecí.

V novembri 1990 navštívil CERN prezident Václav Havel. Vtedy sa začali aj oficiálne rokovania

o podmienkach prijatia Československa do CERN-u. Koncom januára 1991 poverení funkcionári CERN-u – výskumný riaditeľ Walter Hoogland a Owen Lock – navštívili pracoviská, pracujúce vo fyzike vysokých energií v Prahe, Řeži, Bratislave a Košiciach a oboznámili sa s ich výskumným programom a výsledkami. Jednou z hlavných podmienok členstva je totiž schopnosť členskej krajiny aktívne prispievať k vedeckému program CERN-u. V tomto audite sme obstáli dobre a záverom tejto návštevy sa 31. januára v Prahe konalo ďalšie kolo rokovaní o vstupe. Oficiálne jednania pokračovali v Prahe 5. marca a obdobie príprav vyvrcholilo v júni dvojdným seminárom „*Perspektívy ďalšieho rozvoja CERN-u*“ v konferenčnom centre ČSAV v Libliciaciach s bohatou účasťou členov fyzikálnej komunity i predstaviteľov priemyslu za prítomnosti významných predstaviteľov CERN-u. Veľmi dôležitým medzníkom na ceste k členstvu bolo uznesenie federálnej vlády č. 518 z 29. augusta 1991, v ktorom vláda vyjadrila súhlas s prístupom ČSFR k zmluve o zriadení CERN-u. To bolo samozrejme podmienené predchádzajúcimi intenzívnymi rokovaniami ČSAV s najvyššími štátnymi orgánmi, podporou Stálej československej misie v Ženeve, ako aj získaním politickej podpory pre zámer vstupu do CERN-u. Tú sa podarilo nájsť hlavne v strane ODA (Občanská demokratická aliance, dnes už neexistuje, zanikla v roku 2007), najmä u ministra hospodárstva Vladimíra Dlouhého. Ďalším významným formálnym krokom bol podpis dokumentu *Aide-mémoire* o konkrétnych podmienkach členstva v CERN-e dňa 25. októbra 1991. Za CERN ho podpísali prezident Rady William Mitchell a generálny riaditeľ Carlo Rubbia, za ČSFR prvý námestník federálneho ministra strategického plánovania Milan Jurčeka. Prítomný bol aj významný slovenský diplomat Juraj Králik, ktorý bol vtedy vedúcim Stálej misie ČSFR pri OSN a ďalších medzinárodných organizáciách v Ženeve. Medzitým najvyšší riadiaci orgán CERN-u – jeho Rada – pozorne sledovala vývoj udalostí a nakoniec na svojom zasadnutí 20. decembra 1991 jednoducho prijala Československo za člena CERN-u s platnosťou od 1. 1. 1992. Slovo „jednoducho“ je tu podstatné, podľa štatútu s prístupom novej krajiny musia súhlasiť všetky členské štáty.

Prijatie Československa do CERN-u bolo významným vedeckým a politickým úspechom. Zaradili sme sa medzi vyspelé európske krajiny a členstvo v CERN-e bolo modelom pre ďalšiu úspešnú integráciu do európskych štruktúr. A čo bolo pre vedeckú fyzikálnu komunitu najvýznamnejšie – získali sme priamy prístup k unikátnej špičkovej infraštruktúre CERN-u, ktorá sa takto stala súčasťou našej vedecko-

-výskumnej základne. Získali sme možnosť – a aj povinnosť – aktívne sa zúčastňovať na hlavnom vedeckom programe CERN-u a prispievať k riešeniu špičkových projektov časticovej fyziky. Rok po prijatí Československa do CERN-u sa ale nový členský štát rozpadá. Oba nástupnícke štáty – Slovenská republika i Česká republika prejavili vôľu byť členskými štátmi CERN-u. Štatút CERN-u nepočíta s možnosťou automatického uznania členstva nástupníckych štátov a preto členstvo Slovenska a Českej republiky sa muselo riešiť štandardnou, hoci našťastie podstatne skrátenou procedúrou. K skráteniu prispela najmä skutočnosť, že audit v januári 1991 konštatoval existenciu kvalitných fyzikálnych pracovísk v oboch republikách.

Vstup Slovenskej republiky do CERN-u

Nám fyzikom veľmi záležalo na tom, aby aj samostatné Slovensko bolo dôstojným členským štátom CERN-u a zachovali sa možnosti, vytvorené vstupom ČSFR do CERN-u. Na jeseň 1992 sa Juraj Králik po návrate zo Ženevy stáva námestníkom ministra zahraničných vecí SR (MZV) Milana Kňažka. Vďaka nemu sme našli politickú podporu pre zachovanie členstva Slovenska v CERN-e. Udalosti naberali rýchly spád a už 15. decembra 1992 vláda SR prijala prehlásenie k otázkam členstva v medzinárodných vládnych organizáciách, deklarujúc aj záujem zachovať členstvo v CERN-e. Deň predtým Július Hauser, riaditeľ sekcie multilaterálnej spolupráce MZV, zvoláva poradu zástupcov rezortov a vedeckých pracovísk k príprave členstva SR v CERN-e, na ktorej sa pripravili konkrétne kroky. 16. decembra posielala Stála misia ČSFR vedeniu a Rade CERN dve nóty, obsahujúce oficiálnu informáciu o zániku ČSFR a vzniku samostatných štátov – ČR a SR a deklarujúce želanie oboch nových štátov byť plným a nezávislým členom CERN-u. 18. decembra bol v CERN-e podpísaný dokument *Aide-mémoire* zo stretnutia delegácií SR (Miroslav Musil za MZV a Martin Kedro za Ministerstvo školstva a vedy) a CERN (prezident Rady William Mitchell a generálny riaditeľ Carlo Rubbia), deklarujúci spoločnú vôľu vykonať kroky potrebné k čo najskoršiemu umožneniu členstva SR v CERN-e za podmienok rozdelenia členských záväzkov ČSFR medzi ČR a SR v pomere 2 : 1.

Vo februári 1993 sa na Fyzikálnom ústave SAV konalo stretnutie slovenskej časticovej komunity, na ktorom sa diskutujú najmä otázky členstva Slovenska v CERN-e. Zhromaždenie fyzikálnej obce poverilo Ladislava Šándora reprezentovať slovenskú fyzikálnu komunitu na príslušných rokovaniach v CERN-e. V marci 1993 slovenská delegácia (Martin Kedro za ministerstvo školstva a vedy, Martin

Benko zo stálej misie SR v Ženeve za MZV a Ladislav Šándor za slovenskú fyzikálnu komunitu) rokuje v CERN-e počas zasadania Výboru Rady CERN o príprave členstva. 16. marca slovenskú delegáciu prijal prezident Rady CERN William Mitchell. Členovia delegácie tlmočili želanie a pripravenosť vedeckej komunity k tomu, aby sa Slovensko čo najskôr stalo členom CERN-u a odovzdali mu stručnú písomnú informáciu o aktivitách v SR, orientovaných na účasť na programe CERN-u, spolu s krátkou nótou Stálej misie. Stretli sa aj s viacerými delegáciami členských krajín. Výbor Rady CERN prijal 17.3. jednomyselné rozhodnutie zaradiť prijatie SR a ČR do CERN-u na program najbližšieho zasadania Rady CERN. A toto zasadanie, ktoré sa konalo 25. júna 1993, sa ukázalo byť pre nás historickým. Na ňom Rada CERN prijala Slovensko za členský štát CERN-u s platnosťou od 1. júla 1993. Po úspešnom hlasovaní Rada CERN pozvala do rokovacej sály slovenskú delegáciu. Viedol ju vedúci Stálej misie SR v Ženeve veľvyslanec Ján Kubiš a jej členmi boli Martin Kedro, Ladislav Šándor a Martin Benko. Vo svojom vystúpení Ján Kubiš poďakoval Rade za hladký a rýchly priebeh procedúry prijatia.

Svojím uznesením č. 699 z 28. septembra 1993 vymenovala vláda Slovenskej republiky prvých slovenských zástupcov do riadiacich orgánov CERN-u: J. Kubiša a L. Šándora za členov Rady, a Branislava Sitára, alternujúceho s Ľudovítom Krempaským, za členov Finančného výboru CERN-u. Minister školstva Jaroslav Paška zriadil 26. novembra 1993 Výbor pre spoluprácu SR s CERN-om (neoficiálne prípravná komisia pre spoluprácu pracovala od apríla 1993) a vymenoval jeho členov. Prvým predsedom Výboru sa stal Ladislav Šándor. Bolo treba riešiť celý rad naliehavých otázok. K ich riešeniu zo strany fyzikov prispeli najmä Ladislav Šándor a Branislav Sitár. Podarilo sa zabezpečiť hradenie členského príspevku do CERN-u z rozpočtu MZV SR. Začínali sme v roku 1994 symbolickou

sumou 430 tisíc CHF, ktorá za 20 rokov narástla na minuloročných 5,2 miliónov CHF. Najťažšou sa ukázala byť úloha získať účelové financovanie pre reálnu účasť slovenských pracovísk na projektoch CERN-u (členský príspevok slúži len na financovanie infraštruktúry samotného laboratória CERN-u). To sa podarilo až s výraznou podporou ministra školstva Milana Ftáčnika v prvej vláde Mikuláša Dzurindu v novembri 1998. Účelové prostriedky poskytuje zo svojho rozpočtu odborný garant členstva SR v CERN-e – Ministerstvo školstva, vedy, výskumu a športu. Vďaka tomu môžu slovenské pracoviská dôstojne participovať na unikátnom vedeckom programe CERN-u.

Slovensko získalo členstvo v CERN-e v období, keď sa intenzívne pripravovala dlhodobá perspektíva CERN-u – nový špičkový urýchlňovač LHC. Na zasadnutí Rady, na ktorom sme boli prijatí do CERN-u, sa rozhodlo aj o tom, že projekt LHC bude prezentovaný a daný na posúdenie členským krajinám na zasadnutí Rady v decembri 1993. Prezentovali ho spoločne končiaci generálny riaditeľ Carlo Rubbia a nastupujúci (od 1. 1. 1994) Christopher Llewellyn Smith. Začali sa veľmi náročné a netriviálne rokovania a diskusie vo všetkých členských štátoch ako realizovať taký obrovský projekt (s nákladmi niekoľko miliárd CHF). Pre schválenie bolo potrebné získať explicitný súhlas vlád všetkých členských krajín, my sme získali poverenie od vlády SR hlasovať v Rade CERN za schválenie LHC v júni 1994. Výstavba LHC bola schválená konsenzom na zasadnutí Rady CERN 16. decembra 1994. Realizácia urýchlňovača LHC a detekčných aparátúr pre experimenty na ňom trvala dlho, bolo treba riešiť celý rad technologických, materiálových i finančných problémov. Dnes, po troch rokoch úspešnej práce LHC a získaní celého radu nových unikátnych fyzikálnych výsledkov, možno konštatovať, že CERN vykročil správnym smerom a slovenskí fyzici a inžinieri k tomu výrazne prispievajú.

4 Dvadsať rokov práce slovenských fyzikov v CERN-e

Slovenskí fyzici pracovali v CERN-e počas 20 rokov na experimentoch NA34/3, DELPHI, WA94, W97, NA57 a NA49. V súčasnosti participujú na dvoch experimentoch na komplexe LHC. Je to experiment ATLAS, zameraný na štúdium protón – protónových interakcií a experiment ALICE, zameraný na zrážky jadier s jadrami. Zúčastňujú sa aj na menších experimentoch NA62 a ISOLDE a tiež spolupracujú v oblasti teórie. Slovenské skupiny v CERN-e sú predovšetkým z pracovísk:

Fakulta matematiky, fyziky a informatiky UK Bratislava, Ústav experimentálnej fyziky SAV Košice, Prírodovedecká fakulta UPJŠ Košice, Fyzikálny ústav SAV Bratislava a v posledných rokoch aj Univerzita Mateja Bela B. Bystrica, Žilinská univerzita a Technická univerzita Košice. Slovensko má v CERN-e vysoké renomé, čo plne potvrdili výsledky hodnotenia účasti SR v CERN-e Európskym výborom pre urýchlňovače ECFA v rokoch 1999, 2004 a 2011. Ocenením slovenského

vkładu do CERN-u bolo aj zvolenie Branislava Sitára za viceprezidenta Rady CERN v rokoch 2007–2010. Slovenský fyzik Karel Šafařík bol v rokoch 2003–2011 koordinátorom fyziky na experimente ALICE (obr. 4.1). Slovenskí fyzici Dušan Bruncko a Stanislav Tokár majú významné postavenie v experimente ATLAS, Ladislav Šándor a Branislav Sitár v experimente ALICE.



Obr. 4.1 Návšteva prezidenta Slovenskej republiky v CERN-e v septembri 2012, zľava Silvia Gašparovičová, prezident SR Ivan Gašparovič, generálny riaditeľ CERN-u Rolf-Dieter Heuer, koordinátor fyziky na experimente ALICE Karel Šafařík

Dvadsať rokov členstva Slovenska v CERN-e ukázalo, že sa otvorili nové horizonty pre úspešnú a plodnú participáciu slovenskej vedeckej komunity na unikátnom základnom výskume v oblasti nedostupnej menším krajinám bez intenzívnej medzinárodnej spolupráce. Získali sa aj pozitívne a sľubné skúsenosti v oblasti transferu špičkových technológií a získavania atraktívnych zákaziek pre slovenské firmy.

Ministerstvo školstva, vedy, výskumu a športu (MŠVVaŠ) SR je odborným garantom, Ministerstvo zahraničných vecí SR politickým garantom členstva Slovenska v CERN-e. MŠVVaŠ zodpovedá za koordináciu, zabezpečovanie účasti slovenských pracovísk a financovanie spolupráce s CERN-om. Minister školstva vytvoril ako svoj iniciatívny a poradný orgán Výbor pre spoluprácu SR s CERN-om (obr. 4.2). Predsedami Výboru boli Ladislav Šándor (1993–1995), Koloman Ulrich (1995–1998), Štefan Luby (1998–2000), Ján Pišút (2000–2002) a od roku 2002 Branislav Sitár. MŠVVaŠ prostredníctvom Sekcie vedy a techniky ale aj Sekcie vysokých škôl vykonáva koordináciu a finančné zabezpečenie účasti slovenských pracovísk v CERN-e. Ministerstvo zahraničných vecí výrazne prispieva k slovenským aktivitám v CERN-e, najmä prostredníctvom Stálej misie SR v Ženeve. Ministerstvo hospodárstva SR významne pomáha a podporuje spoluprácu slovenských podnikov s CERN-om.



Obr. 4.2 Zasadanie Výboru pre spoluprácu SR s CERN-om 4. apríla 2013. Zľava: Ivan Tomašovič (MH), Andrea Danková (MŠVVaŠ), Zuzana Hlaváčiková (MŠVVaŠ), Branislav Sitár, predseda (FMFI UK), Ladislav Šándor, podpredseda (ÚEF SAV), Jozef Urbán (PF ÚPJS), Stanislav Tokár, tajomník (FMFI UK), Dušan Bruncko (ÚEF SAV), Martin Veselský (FÚ SAV), Boris Tomášik (UMB), Ivan Králik (ÚEF SAV), Štefan Molokáč (ILO).

Zastupovanie SR v orgánoch CERN-u

Dôležitou súčasťou členstva v CERN-e je aj zastúpenie Slovenska v riadiacich orgánoch CERN-u. Vedeckého delegáta SR v Rade CERN menuje vláda SR na návrh ministra školstva. Vedeckými delegátmi SR v Rade CERN boli Ladislav Šándor (1993–1995), Branislav Sitár (1995–1998), Ján Pišút (1999–2002) a od roku 2002 Branislav Sitár.

Vedúci stálej misie (veľvyslanec) SR pri Organizácii spojených národov a ďalších medzinárodných organizáciách v Ženeve je vládou vymenovaný ex offo za politického delegáta SR v Rade CERN. Od vstupu SR do CERN-u boli politickými delegátmi SR v Rade CERN veľvyslanci: Ján Kubiš (1993–1995), Mária Krásnohorská (1995–1999), Kálmán Petöcz (1999–2006), Anton Pinter (2006–2009) a od roku 2009 Fedor Rosocha.

Delegátom SR vo Finančnom výbore CERN-u je obvyčajne generálny riaditeľ Sekcie vedy a techniky MŠVVaŠ SR alebo ním poverený pracovník ministerstva (MŠVVaŠ). Odborný garant spolupráce SR v CERN-e (MŠVVaŠ) má v CERN-e aj rolu financujúcej agentúry (Funding Agency). Zástupcovia financujúcich agentúr majú pravidelné zasadania v CERN-e v Rade pre revíziu zdrojov (Resources Review Board – RRB). Zástupcu SR v RRB nominuje minister školstva z pracovníkov Sekcie vedy a techniky. Slovensko má predstaviteľa aj v Európskom výbore pre budúce urýchľovače (ECFA). Zástupcami SR v ECFA boli postupne: Ján Pišút, Peter Chochula, Jaroslav Antoš, Ivan Králik, Vladimír Černý a v poslednom období Boris Tomášik.

Účasť SR vo vedeckých programoch CERN-u

Účasť sa realizuje v súlade s dlhodobou koncepciou platnou od nášho vstupu do CERN-u v roku 1993 a aktualizovanou koncepciou prijatou v roku 2009 Výborom pre spoluprácu SR s CERN-om a potvrdenou ministrom školstva (MŠVVaŠ). Experimentálne kolaborácie v CERN-e majú vypracované pravidlá činnosti, ktoré naša koncepcia rešpektuje. Základným princípom je vyvážená účasť slovenských fyzikov v protónovom a jadrovom programe CERN-u. Toto je realizované silnou účasťou SR v experimentoch ATLAS a ALICE na LHC.

V súčasnosti (2012) je zo Slovenska v CERN-e registrovaných 82 užívateľov (user). Okrem toho sú dvadsiati dvaja slovenskí fyzici a inžinieri dlhodobými alebo permanentnými zamestnancami a štipendistami CERN-u. Slovenské skupiny sa na LHC zúčastňujú na projektoch ALICE a ATLAS. Slovenská účasť v experimente ALICE je veľmi viditeľná a porovnateľná s oveľa väčšími krajinami ako je Slovensko.

Výbor pre spoluprácu SR s CERN-om podporuje slovenskú účasť aj v iných experimentoch, ktoré sú tematicky odlišné od LHC experimentov ATLAS a ALICE. V minulosti slovenské skupiny pracovali na experimentoch NA34/3, DELPHI, WA94, WA97, NA57 a NA49. Od roku 2010 sa intenzívne rozbieha spolupráca SR na zariadení ISOLDE v CERN-e. Tým sa naša spolupráca s CERN-om obohatila o ďalší vedecký smer zameraný viac na jadrovú fyziku a výskum antihmoty. Výbor CERN podporuje aj spoluprácu slovenských pracovísk na experimente NA 62. Na práci v CERN-e sa podieľajú aj teoretickí fyzici. V oblasti teoretickej fyziky spolupracuje s CERN-om 15–20 fyzikov, na projekte vybudovania slovenskej časti vedeckej počítačovej siete WLCG (World LHC Computing Grid) sa zúčastňuje okolo 15 fyzikov a inžinierov.

Slováci na dlhodobých pobytoch v CERN-e

Slovenský príspevok do CERN-u je veľmi dobre využitý aj dlhodobou účasťou 22 slovenských fyzikov, inžinierov a študentov v CERN-e ($\sim 0,8\%$ z celkového počtu pracovníkov CERN-u). Počet Slovákov v CERN-e vzhľadom ku nášmu finančnému príspevku ($0,48\%$) patrí k najvyšším. V CERN-e je zo Slovenska v súčasnosti 11 pracovníkov s dlhodobým kontraktom, 8 pracovníkov projektov, 1 štipendista a 2 doktorandi.

Viacerí Slováci zastávajú v CERN-e významné funkcie:

- Ivan Mikulec, v CERN-e od 1991. Prevádzka plynových detektorov experimentu DELPHI, koordinátor fyzikálnej analýzy a spúšťacieho systému na experimentoch DELPHI a CMS.

- Daniel Valúch, v CERN-e od 2000. Spoluzodpovedný za vývoj a prevádzku urýchľovacieho systému LHC a systému priečnej stabilizácie zväzku pre LHC. Vedúci vývoja vysokofrekvenčných obvodov pre urýchľovač rádioaktívnych iónov v HIE-Isolde.
- Peter Lichard, v CERN-e od 1991. Vývoj, konštrukcia a prevádzka detektorov a čítacej elektroniky pre experimenty ATLAS a NA62.
- Viliam Senaj, v CERN-e od 2007. Zodpovedný za „dump kicker“ systémy v LHC a SPS: Kontrola, údržba a modernizácia systémov kritických pre bezpečnosť SPS a LHC.
- Peter Rosinský, v CERN-e od 2001. Vývoj a prevádzka detekčných systémov pre experimenty DELPHI a NA60. Člen koordinačného tímu pre kontrolný systém experimentu ALICE.
- Pavol Vojtyla, v CERN-e od 1997. Člen expertnej sekcie pre posudzovanie nových projektov z hľadiska bezpečnosti. Vybudovanie a prevádzka laboratória pre sledovanie radiačnej úrovne v CERN-e a okolí, správy pre authority v hostiteľských štátoch.
- Karel Šafařík, v CERN-e od 1993. Zástupca vedúceho experimentu WA97, príprava experimentu ALICE. Koordinátor „offline“ systému a fyziky v experimente ALICE. V súčasnosti vedúci fyzikálnej a výpočtovej skupiny experimentu ALICE a koordinátor modernizácie experimentu.
- Peter Chochula, zástupca koordinátora kontrolného systému experimentu ALICE, v CERN-e od 1996, Vývoj a prevádzka polovodičových detektorov na experimente DELPHI, vývoj pixelových detektorov a kontrolného systému pre experiment ALICE. Koordinátor projektu SK GRID.
- Anton Jusko, v CERN-e od 2006. Programové vybavenie pre „online“ systémy experimentov WA97, NA57, ATLAS, ALICE. V súčasnosti zodpovedný za programové vybavenie spúšťacieho systému experimentu ALICE.
- Jozef Podolec, v CERN-e od 1998. Softvérový inžinier, vývoj a podpora databáz a aplikácií pre administratívny sektor.
- Tibor Šimko, v CERN-e od 1998. Vedúci vývojový inžinier a manažér systému spravovania vedeckých publikácií, dát, a multimediálnych informácií „Invenio“.
- Ivan Fedorko, v CERN-e od 2007. Člen skupiny zodpovednej za vývoj systému pre zber dát z experimentu ATLAS. V súčasnosti pracuje v tíme, ktorý sa zaoberá vývojom nástrojov pre spravovanie veľkých počítačových fariem (10 000 serverov).

- Vladimír Bahyl, v CERN-e od 2001. Vývoj a správa systémov zameraných na prevádzku počítačových fariem. Zodpovedný za páskový archív uchováajúci LHC dáta.
- Marián Krivda, v CERN-e od 2005. Vývoj, konštrukcia a prevádzka spúšťacej a čítacej elektroniky pre experimenty ALICE a NA62.
- Marián Babik, v CERN-e od 2009. Vývoj a podpora monitorovacích systémov pre gridové počítačové centrá LHC experimentov. Koordinátor projektu SAM zameraného na kontrolu spoľahlivosti počítačových centier v rámci Európskej Gridovej Infraštruktúry (EGI).
- Ivica Dobrovičová, v CERN-e od 1993. Softvérová inžinierka, vývoj a podpora aplikácií pre administratívny sektor, zodpovedná za ERP (finančný a obstarávací modul).

Finančné zabezpečenie účasti slovenských pracovísk na vedeckom programe CERN-u

Ročný rozpočet CERN-u je vyše 1,1 miliardy švajčiarskych frankov. Členské štáty prispievajú do rozpočtu v pomere svojich národných dôchodkov. Slovensko dostalo pri vstupe veľmi výhodné podmienky – značne zredukovaný členský príspevok 430 tisíc CHF a postupný prechod k plateniu plnej výšky členského príspevku do roku 2002. V roku 2012 členský príspevok Slovenska predstavoval 0,48 % rozpočtu CERN-u, čo je ročne okolo 5,2 milióna švajčiarskych frankov.

Z členstva v CERN-e vyplývajú dva základné záväzky: platiť dohodnutý členský príspevok a aktívne sa podieľať na hlavnom programe CERN-u. Členský príspevok sa od roku 2006 hradí z rozpočtu Ministerstva školstva SR (predtým Ministerstvo zahraničných vecí). Jeho uhradenie nám dáva iba právo pokladať CERN za súčasť vedecko-výskumnej základne SR a využívať unikátne bázové zariadenia (najmä urýchľovače) a infraštruktúru CERN-u. Plnenie druhej úlohy – aktívnej participácie na programe CERN-u – vyžaduje ďalšie účelové prostriedky. Zúčastniť sa na experimente v CERN-e znamená prispieť k vývoju a budovaniu potrebnej aparatury (detektorov), podieľať sa na realizácii experimentu v CERN-e (účasť na testoch a realizácii experimentu, prevádzkové náklady, pobyty odborníkov...), ako aj na vyhodnocovaní a analýze veľkých objemov údajov v CERN-e a na domácich vedeckých pracoviskách. Dôležitým milníkom v otázke financovania aktivít v CERN-e bolo prerokovanie iniciatívneho materiálu ministerstva školstva „Návrh na finančné zabezpečenie účasti pracovísk SR na vedeckom programe Európskej organizácie pre fyziku častíc CERN“ vo vláde dňa 18. novembra 1998. Na základe prijatého uznesenia

vlády SR č. 791/1998 boli vytvorené efektívnejšie podmienky na využitie vedeckého, technického a technologického potenciálu CERN-u.

Finančné záväzky na experimenty za SR sú premietnuté do podpísaných Memoránd o porozumení. „Memorandum of Understanding for Collaboration in Construction of the ALICE Detector (MoU ALICE)“ bolo podpísané ministrom školstva SR 27. novembra 2000 a „Memorandum of Understanding for Collaboration in Construction of the ATLAS Detector (MoU ATLAS)“ bolo podpísané štátnym tajomníkom ministerstva školstva SR 7. júla 1998. Podľa nich SR na výstavbu experimentu ATLAS prispela sumou 832 tis. CHF a na experiment ALICE sumou 809 tis. CHF. Významná časť týchto záväzkov sa splnila dodávkami prístrojov a zariadení. Prácou slovenských fyzikov a inžinierov bolo ušetrených až do 40 % vyčlenených prostriedkov na tieto povinné príspevky slovenských pracovísk do experimentov. Okrem toho sa pri tomto procese podarilo vybudovať laboratória v Bratislave a Košiciach na špičkovej technologickej úrovni.

Slovenské skupiny sa od roku 2002 podieľajú finančným príspevkom aj na prevádzke a údržbe (M&O) experimentov ALICE a ATLAS na základe dokumentov „Memorandum of Understanding for Maintenance and Operation of the ALICE Detector“ (MoU M&O ALICE) a „Memorandum of Understanding for Maintenance and Operation of the ATLAS Detector“ (MoU M&O ATLAS) podpísaných ministrom školstva 26. novembra 2002.

Finančný príspevok na M&O je odvodzovaný od počtu evidovaných pracovníkov (tzv. autori) z tej ktorej krajiny na danom experimente. Záväzky SR sú pravidelne vyhodnocované na Rade CERN, vo Finančnom výbore CERN a v Rade pre revíziu zdrojov (Resources Review Board). Účelové financovanie programu CERN vytvára podmienky pre dôstojné, plnohodnotné členstvo Slovenska v CERN-e a efektívne využitie unikátneho vedeckého i technologického potenciálu CERN-u.

Výsledky práce slovenských skupín v CERN-e

Experimenty na LHC (pre nás sú zaujímavé predovšetkým ATLAS a ALICE) sa za posledné roky 2010-2012 stali hotovou fabrikou na excellentné fyzikálne výsledky. Tieto experimenty sú mnohoúčelové a dokážu efektívne vyhodnotiť zrážky protón-protón, jadro-jadro a protón-jadro. Keď k tomu pridáme rekordnú energiu zrážok (multi TeV), potom každý výsledok je unikátny. Na spracovaní výsledkov z LHC pracuje vo svete mnoho skupín a každá je schopná z naakumulo-

vaných dát (stovky miliárd zrážok) vytážiť iný fyzikálny výsledok. V roku 2012 len experiment ATLAS opublikoval 130 článkov a ALICE 25 článkov v najrenomovanejších fyzikálnych časopisoch. Vedúci týchto experimentov v CERN-e poverujú často vedcov zo Slovenska, aby prezentovali výsledky dosiahnuté celou kolaboráciou na významných svetových konferenciách.

Dopad spolupráce SR s CERN-om na iné vedné odbory a na priemysel

Okrem zásadných prínosov pre vedecké poznanie v oblasti časticovej fyziky súvisiacich so základnými otázkami vzniku, existencie a usporiadania vesmíru, Zeme a života, má členstvo SR v CERN-e a práca našich experimentálnych skupín v CERN-e dopad na iné vedné odbory a na priemysel v SR. Týmto sa značná časť príspevku vracia do SR a to napriek tomu, že princípom výskumu v CERN-e nie je ekonomický zisk, ale rozvoj základných vedeckých poznatkov a ich aplikácie. Celková hodnota dodávok slovenských firiem do CERN-u od roku 1993 dosiahla viac ako 22 miliónov CHF. SR sa radí medzi krajiny s najvyšším koeficientom návratnosti medzi členskými krajinami najmä vďaka vysokej kvalite svojich dodávateľov.

Návratnosť investícií do CERN-u získavaním objednávok z CERN-u

Slovenské podniky sa pravidelne zúčastňujú súťaží na zákazky pre CERN, ktorý každoročne investuje približne tretinu svojho rozpočtu do nákupu nových prístrojov a zariadení. Po vstupe SR do CERN-u bolo do databázy CERN-u zaradených 59 slovenských podnikov. Tieto podniky sa môžu uchádzať o účasť v súťažiach CERN-u. Databáza je každoročne aktualizovaná. Výber dodávateľov pre CERN je veľmi náročný a úspech v súťaži sa všeobecne považuje za prejav uznania pre dodávku najvyššej kvality.

Návratnosť investícií z CERN-u sa vyjadruje koeficientom návratnosti (Industrial return), ktorý je definovaný ako podiel objednávok pre daný členský štát (vzhľadom na celkovú hodnotu objednávok z CERN-u) ku časti príspevku členského štátu do rozpočtu CERN-u v danom období. Za rok 2000 mal tento koeficient najvyššiu hodnotu pre Švajčiarsko – 2,76 a druhú najvyššiu hodnotu dosiahlo Slovensko 2,17, takže Slovensko bolo vysoko ziskové.

Od roku 2000 bol zabezpečovaním styku medzi CERN-om a slovenskými hospodárskymi inštitúciami s cieľom získavať pre tieto inštitúcie zákazky z CERN-u (Industrial Liaison Officer – ILO) poverený Štefan Molokáč. ILO sa zúčastňuje pravidelných

a mimoriadnych zasadnutí Finančného výboru CERN, kde sú okrem finančných otázok odsúhlasované výsledky výberových konaní na dodávku technológií a zariadení pre CERN. Od roku 2001 bol vymenovaný aj ďalší ILO – Ľubomír Čergel, bývalý pracovník spoločnosti Motorola v Ženeve. V roku 2001 Koeficient návratnosti bol 1,57 čo predstavovalo 3. miesto medzi členskými štátmi CERN-u. Rok 2004 možno považovať z hľadiska návratnosti za jeden z najúspešnejších s koeficientom návratnosti 2,57, čo predstavovalo hodnotu 4 309 107,– CHF. Tento vysoký koeficient návratnosti bol hlavne v dôsledku dvoch dodávok: Slovenské energetické strojárne, a.s. (SES) Tlmače dodali 969 kusov veľkých kryogénnych vákuových nádob pre supravodivé magnety na LHC a Výskumno-vývojový ústav ZŤS Košice a.s. dodal robotické zariadenia na presné uloženie veľkých kryomagnetov v tuneli LHC. Roboty dosiahli presnosť uloženia 0,1 mm, za čo CERN udelil v r. 2005 firme ZŤS VVÚ KOŠICE prestížne ocenenie Golden Hadron award (obr. 4.3). Slovensko bolo v roku 2006 najúspešnejšou členskou krajinou CERN-u s koeficientom návratnosti 2,77.



Obr. 4.3 VVÚ ZŤS KOŠICE a.s. vyhrala medzinárodnú súťaž na dodávku robotických zariadení na presné uloženie veľkých kryomagnetov v tuneli LHC. Roboty dosiahli presnosť uloženia 0,1 mm, za čo CERN udelil v r. 2005 firme prestížne ocenenie Golden Hadron Award. Tretí sprava je obchodný riaditeľ VVÚ ZŤS Ladislav Vargovčík

Prenos technológií z CERN-u

Členstvo SR v CERN-e má dopad na iné vedné odbory a na priemysel v SR. CERN je dôležitým zdrojom transferu špičkových technológií do SR

s možnosťou priameho zaučenia našich špecialistov v rôznych oblastiach. Ide najmä o počítačové kódy, knižnice, informačné technológie, o fyziku materiálov a kryogeniku. SR je ako členská krajina CERN-u spoluvlastníkom nových objavov a technológií vyvinutých v CERN-e. CERN je lídrom v oblasti vývoja detektorov častíc a žiarenia, niektorých zariadení pre oblasť medicíny, supravodivých magnetov, počítačových sietí (Computer Grid). V CERN-e bol tiež navrhnutý a správkovaný Web.

Účasť Slovenska na vedeckej počítačovej sieti WLCG

Výbor pre spoluprácu SR s CERN-om v roku 2004 schválil projekt „Vybudovanie Slovenskej vedeckej počítačovej siete SLCG“ a jej napojenie na počítačovú sieť World LHC Computer Grid – WLCG. Ideovým vedúcim projektu bol Peter Chochula. Budovanie WLCG centier na Slovensku bolo rozdelené do 4 etáp realizovaných v rokoch 2004, 2005–2006, 2007–2008 a po roku 2008. Z hľadiska účasti slovenských pracovísk na analýze fyzikálnych údajov z LHC je najdôležitejší fakt, že prístup k experimentálnym dátam z LHC je možný iba v rámci hierarchie WLCG. Z toho dôvodu musia byť aj slovenské počítačové farmy jeho súčasťou.



Obr. 4.4 Časť počítačového centra WLCG na FMFI UK Bratislava

Na Slovensku sa vybudovali dve centrá WLCG: FMFI UK Bratislava (obr. 4.4) a ÚEF SAV / UPJŠ Košice (obr. 4.5). Centrá v Bratislave a Košiciach sú v súčasnosti najvýkonnejšie počítačové farmy na slovenských vedeckých pracoviskách, navyše napojené na obrovskú počítačovú kapacitu WLCG. Obe centrá sú dnes využívané rovným dielom experimentmi ATLAS aj ALICE, v predchádzajúcom období centrá využívala viac ALICE.



Obr. 4.5 Časť počítačového centra WLCG na ÚEF SAV Košice

Na FMFI budovanie centra zabezpečovali Branislav Sitár a Stanislav Tokár a technickí experti: Pavol Šťavina, Tibor Ženiš, Matej Zagiba, Vladimír Fekete, Róbert Breier, Michal Broz a Michal Mereš.

Na ÚEF SAV – UPJŠ Košice Ladislav Šándor, Dušan Bruncko, Pavol Stríženec a technickí experti: Miloš Straka, Ingrid Kul'ková, Martin Vaľa, Richard Bílek, Janka Vrláková, Marián Babik a Marián Zvada.

Počítačové centrá sú každoročne rozširované a modernizované. V roku 2012 bolo zrealizované rozšírenie klastra WLCG na FMFI UK Bratislava na 168 procesorov obsahujúcich 672 jadier a pamäťové pole s objemom 292 TB (obr. 4.4). Na farme FMFI UK bolo od jej spustenia doteraz (2013) v rámci WLCG úspešne spracovaných viac ako 1,5 milióna výpočtových úloh. Centrum v Košiciach malo v roku 2013 408 jadier a 212 TB pamäte. Od spustenia do marca 2013 spočítalo 1,68 milióna výpočtových úloh. Ku košickému klastru prispieva v súčasnosti aj Technická univerzita s objemom 20 jadier a 2 TB diskovej pamäte.

Každoročne je vykonaných niekoľko aktualizácií systému. Permanentne sú vykonávané rôzne softvérové a hardvérové inovácie systému. Inovácie prebiehajú za neustálej komunikácie s EGI Slovakia, s ktorou sa riešia aj bezpečnostné alarmy.

V roku 2012 MŠVVaŠ podpísalo s CERN-om zmluvu „Memorandum of Understanding for collaboration in the deployment and exploitation of the WLCG“, čím sa legalizovalo postavenie výpočtových centier WLCG na FMFI UK Bratislava a ÚEF SAV v Košiciach. Slovensko vystupuje vo WLCG ako „TIER 2“ federácia počítačových centier v Bratislave a Košiciach. V časti ALICE sa už aj dovedty intenzívne počítali úlohy v rámci WLCG.

Vzdelávanie Slovákov v CERN-e

Účasť doktorandov na projektoch CERN-u

CERN poskytuje výborné podmienky pre výchovu študentov a mladých fyzikov pre prácu na zariadeniach, ktorými Slovensko nedisponuje. Na spolupráci s CERN-om sa zúčastňuje pravidelne viac ako 40 študentov, doktorandov a mladých fyzikov, ktorí získavajú kvalifikáciu, ktorá im otvára dvere do najvýznamnejších fyzikálnych laboratórií sveta. Výbor pre spoluprácu SR s CERN-om sa rozhodol od roku 2006 vyčleniť časť účelových prostriedkov pre prácu na projektoch CERN aj na dlhodobšie pobyty (viac ako 3 mesiace) predovšetkým mladých slovenských odborníkov v CERN-e.

Doktorandi v časticovej a jadrovej fyzike

Doktorandi sa školia na slovenských školiacich pracoviskách, zapojených do spolupráce s CERN-om. Témy ich dizertačných prác sú zamerané na projekty CERN. Časť výskumnej práce na dizertácii realizujú počas kratších i dlhodobjších pobytov v CERN-e aktívne sa zúčastňujú na experimentoch. Tu môže CERN ako aj spolupracujúce zahraničné pracoviská poskytnúť pomoc špičkových odborníkov formou konzultácií a systematických pracovných kontaktov. Študijné pobyty doktorandov sú financované z účelových finančných prostriedkov vyčlenených MŠ SR na spoluprácu s CERN-om. Je potešiteľné, že o tento druh štúdia je veľký záujem.

Výrazným zlepšením spolupráce s CERN-om bola schéma grantovej podpory študentov, doktorandov a postdoktorandov, ktorá sa na základe výzvy MŠVVaŠ fungovala v rokoch 2009–2010. Dvadsaťštyri študentov (PhD a Mgr.) a mladých fyzikov dostalo granty, ktoré im umožnili pol roka pracovať v CERN-e pod dohľadom špičkových fyzikov. Toto opatrenie jednoznačne zvýšilo kvalitu dizertačných prác a prípravy mladých fyzikov na budúce povolanie. Nová schéma umožnila udržať na Slovensku najlepších mladých odborníkov z oblasti fyziky elementárnych častíc. Výbor CERN zhodnotil túto akciu ako mimoriadne úspešnú. Výbor pracuje na tom, aby sa akcie tohto druhu vo vhodnej forme opakovali aj v budúcnosti.

Významná pomoc CERN-u pri výchove mladej vedeckej generácie začína organizovaním letných kurzov pre študentov 4.–5. ročníka univerzít. Vybraní študenti trávajú skoro 2 mesiace v CERN-e, kde sa zúčastňujú na cykle veľmi kvalitných prednášok a seminárov. Časť svojho času pracujú vo výskumných skupinách CERN-u pod vedením skúsených odborníkov, kde získavajú prvé návyky vedeckej práce. Týchto pobytov, plne hrađených CERN-om, sa slovenskí študenti pravidelne zúčastňujú.

Podpora doktorandského štúdia v aplikovanej fyzike a technických odboroch s finančnou podporou CERN-u

Doktorandi sú vo vedeckej výchove na univerzitách členských krajín. CERN poskytuje podporu na ročný až dvojročný pobyt zameraný na výskumnú prácu smerujúcu k dizertačnej práci a poskytne aj kvalitných školiťov-špecialistov. Počet doktorandov je ale daný finančnými možnosťami CERN-u. Počet doktorandov z tej ktorej členskej krajiny je odvodzovaný od finančného príspevku príslušnej krajiny. (SR v súčasnosti prispieva do celkového rozpočtu 0,48 %). Predpokladom pre úspešný výber je vysoká odborná úroveň kandidáta. Výber má presné pravidlá. Obvykle máme v CERN-e dvoch takýchto doktorandov. Treba poznamenať, že slovenskí delegáti v Rade CERN, ktorá schvaľuje počty doktorandov, sa snažia o zvýšenie daného počtu.

Zvyšovanie kvalifikácie v CERN-e

Za dvadsať rokov členstva Slovenskej republiky v CERN-e boli obhájené desiatky dizertačných a diplomových prác spojených s úlohami riešenými v spolupráci s CERN-om. Aj mnohé habilitačné a inauguračné pokračovania na docentov a profesorov mali za základ spoluprácu slovenských fyzikov s CERN-om. Spolupráca s CERN-om jednoznačne prispieva ku zvyšovaniu kvality vedeckej práce na Slovensku. Mnohí absolventi magisterského alebo doktorandského štúdia zo Slovenska sa veľmi dobre uplatnili v CERN-e alebo v laboratóriách spolupracujúcich s CERN-om. Z mnohých spomenieme Mariána Ivanova (teraz pracovníka GSI Darmstadt) a Ivana Kráľika, ktorí majú významné postavenie v kolaborácii ALICE v CERN-e. Matúš Kaliský získal magisterský titul v Bratislave, PhD v Nemecku a teraz úspešne funguje na ALICE. Pavol Stríženec je jedným z troch zodpovedných za celú kalorimetriu detektora ATLAS.

Školenia učiteľov a študentov v CERN-e

Od roku 2007 sa Slovensko pripojilo k programu CERN zameraného na vzdelávanie učiteľov fyziky. V CERN-e ho organizuje Centrum pre vzdelávanie pod vedením Micka Storra. Na Slovensku sa organizácie ujalo Oddelenie didaktiky fyziky ÚFV PF UPJŠ v Košiciach, predovšetkým Zuzana Ješková a Slovenská fyzikálna spoločnosť. Na národnom programe CERN pre študijné pobyty učiteľov fyziky sa v priebehu posledných rokov aj vďaka projektu APVV zúčastnilo spolu 150 stredoškolských učiteľov.

Cieľom programu je získanie a prehĺbenie poznatkov z fyziky elementárnych častíc a kozmológie a

d ďalších oblastí súvisiacich s výskumom v CERN-e prostredníctvom autentických stretnutí so slovenskými a českými vedcami pracujúcimi v CERN-e, prostredníctvom návštev pracovísk a laboratórií a ďalších vzdelávacích aktivít. Prednášky v slovenskom jazyku prednášali slovenskí pracovníci v CERN-e – Karel Šafařík, Peter Chochula, Ivan Mikulec, Juraj Súčík, Marek Domaracký, Pavol Vojtyla, Marián Babik a ďalší. Niektoré prednášky zabezpečili pozvaní fyzici zo Slovenska – Ján Pišút, Gabriela Martinská, Martin Mojžiš, Ladislav Šándor a ďalší, astrofyziku prednášal Jiří Grygar z Prahy. Medzi učiteľmi mala veľký ohlas návšteva experimentálnych zariadení ATLAS a ALICE. Školenia slovenských učiteľov fyziky v CERN-e majú pozitívny dopad na úroveň vyučovania fyziky na stredných školách. Pobyty slovenských učiteľov v CERN-e sa plánujú aj na ďalšie roky.

Na pobyty učiteľov a študentov v CERN-e nadviazal v roku 2009 celoslovenský seminár účastníkov pobytu v CERN-e, ktorý sa uskutočnil paralelne na pôde PF UPJŠ v Košiciach a FMFI UK v Bratislave videokonferenčnou technológiou s účasťou učiteľov – účastníkov pobytov v CERN-e 2007, 2008 a 2009. Cieľom seminára bola výmena skúseností z využívania poznatkov získaných počas pobytu v CERN-e. V rámci programu vystúpili Karel Šafařík, Július Vanko, Gabriela Martinská, Ladislav Šándor. Učitelia počas seminára realizovali samostatné aktivity zamerané na projekt MASTERCLASSES, v rámci ktorého vyhodnocovali sériu dát z experimentov v CERN-e. V rámci seminára učitelia získali DVD s materiálmi z pobytu v CERN-e s videonahrávkami a prezentáciami prednášok, fotografiami a rozličnými materiálmi využiteľnými vo vyučovaní.

Na týždňových študijných pobytoch v CERN-e sa s podporou APVV a slovenskej fyzikálnej komunity zúčastnilo 150 slovenských stredoškóľakov, víťazov a úspešných riešiteľov rôznych fyzikálnych súťaží (Fyzikálna olympiáda, Turnaj mladých fyzikov, FyzIQ, FKS a iné) a projektov (Masterclasses, Cascade).

Nadšenie učiteľov fyziky inšpiruje žiakov na celom Slovensku, ktorí sa potom zúčastňujú na vzdelávacích programoch Masterclasses a Cascade. Šesť slovenských univerzít spoluorganizuje Medzinárodné Masterclasses v časticovej fyzike pre 300 stredoškóľakov každý rok. Študenti pracujú s reálnymi dátami z CERN-u. Trojčlenné tímy stredoškóľakov sa zúčastňujú súťaže projektov CASCADE na témy z časticovej fyziky. Projekty potom prezentujú na svojich školách pre viac ako 500 študentov ročne. Aktívne im pomáhajú členovia slovenskej fyzikálnej komunity.

Propagácia fyziky v médiách

Vedúci fyzici v slovenských skupinách v CERN-e, hlavne D. Bruncko, B. Sitár, L. Šándor, S. Tokár, Z. Blažek, V. Černý a M. Mojžiš majú každoročne mnoho vystúpení v celoštátnych televíziách, rozhlase a tlači. Predniesli aj mnoho popularizačných prednášok, napríklad B. Sitár mal o CERN-e hlavnú prednášku na podujatí „Noc výskumníkov“ v Bratislave v roku 2012. Styk s CERN-om v oblasti popularizácie výsledkov vedy zabezpečuje Ivan Melo zo Žilinskej univerzity, ktorý pravidelne dodáva správy z CERN-u do všetkých médií.

Záverom

Možno konštatovať, že členstvo SR v CERN-e je jednoznačne pozitívne, efektívne a potrebné. Je veľkým prínosom pre rozvoj slovenskej vedy a techniky, prínosom v oblasti prenosu najnovších technológií do SR, obohatením vedeckej a technickej úrovne našich ústavov a podnikov. Je veľkým prínosom pre priemysel SR, jednak dodávkami do CERN-u prevyšujúcimi výšku nášho príspevku, jednak výrazným zvyšovaním technologickej úrovne podnikov. Prístup slovenských vedcov do svetových počítačových sietí WLCG a EGI im umožní používať prakticky neobmedzenú výpočtovú kapacitu, ktorú si SR sama nedokáže zabezpečiť.

5 Experiment ATLAS

Experiment ATLAS je kolajderový experiment na LHC, navrhnutý na skúmanie hlboko-nepružných protón-protónových zrážok pri zrážkovej energii 14 TeV. Okrem toho má za úlohu skúmať aj jadro-jadrové, prípadne protón-jadrové zrážky.

Štruktúra detektora ATLAS

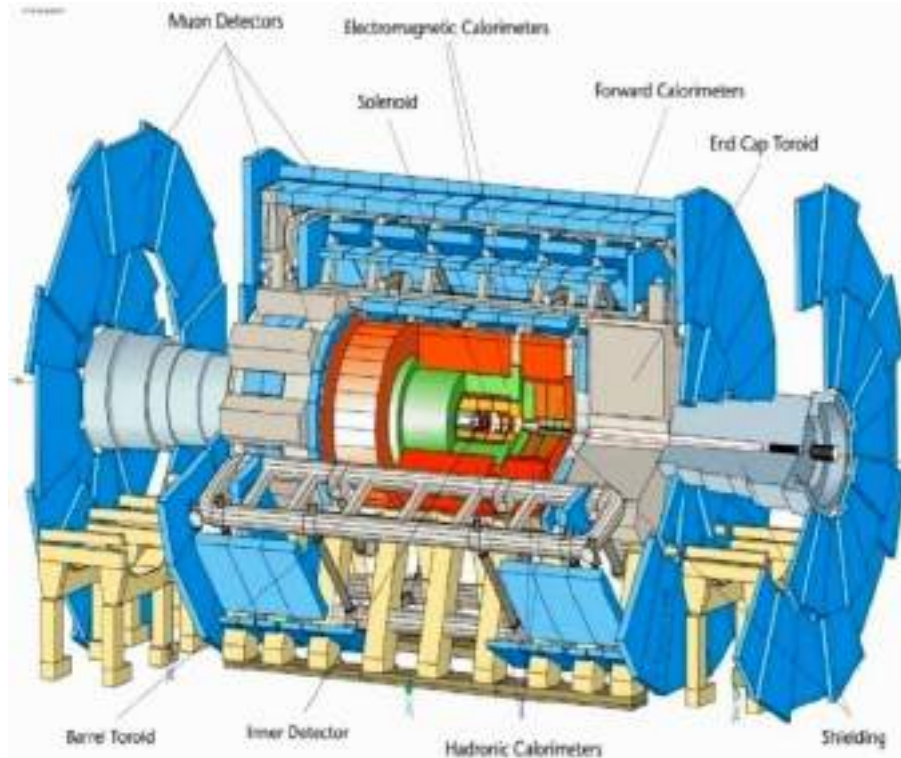
Detektor ATLAS (obr. 5.1) je mnohoúčelový detektor pre fyziku častíc, ktorý je inštalovaný na jednom z interakčných bodov zväzkov LHC. Po-

krýva temer celý priestorový uhol okolo kolízneho bodu. Najvnútornejšou časťou detektora ATLAS je vnútorný dráhový detektor, ktorý pozostáva z troch častí: z kremíkového pixelového detektora, z kremíkového mikrostripového detektora a z detektora prechodového žiarenia. Vnútorný detektor pokrýva v pseudorapídite oblasť $|\eta| < 2,5$ a je obklopený tenkým supravodivým solenoidom zabezpečujúcim magnetické pole s indukciou 2 T. Úlohou vnútorného detektora je rekonštrukcia trajektórií

častíc vychádzajúcich z miesta interakcie. Zo zakrivenia časticových trajektórií je možné určiť hybnosť častíc. Druhú vrstvu detektorov okolo interakčného bodu predstavuje systém kalorimetrov. Vnútrná časť tejto vrstvy je vyplnená elektromagnetickým vzorkovacím (sampling) kalorimetrom skonštruovaným na báze technológie kvapalného argónu (LAr).

Elektromagnetický kalorimeter, ktorý sa vyznačuje vysokou granularitou a hĺbkovým členením, slúži hlavne na meranie energie elektrónov, pozitronov a fotónov. Za ním nasleduje hadrónový

kalorimeter, kde aktívny materiál predstavujú scintilačné platne a absorbér je tvorený železnými platňami. Tento kalorimeter slúži na meranie energie hadrónov a jetov v centrálnej oblasti: $|\eta| < 1,7$. Predná a zadná oblasť vrstvy kalorimetrov je vybavená LAr-kalorimetrami pre meranie elektromagnetickej a hadrónovej energie až do pseudorapidity $|\eta| = 4,9$. Kalorimetrický systém je obklopený miónovým spektrometrom zahŕňajúcim 3 supravodivé toroidálne magnety a zabezpečujúcim meranie hybnosti miónov pre oblasť: $|\eta| < 1,7$.



Obr. 5.1 Schéma experimentu ATLAS

Základné ciele experimentu ATLAS

Základným cieľom experimentu ATLAS je preskúmanie platnosti Štandardného modelu elementárnych častíc a zároveň hľadanie prejavov novej fyziky. V súvislosti s tým je možné konkrétne hovoriť o nasledovných základných úlohách:

- Pôvod mechanizmu spontánneho narušenia symetrie v elektroslabom sektore – to predstavuje fyziku Higgsového bozónu – jeho objav a štúdium jeho základných vlastností. Súčasťou tejto úlohy je pochopiť, ako častice nadobúdajú hmotnosť.
- Štúdium fyziky top kvarku – LHC je top kvarkovou „fabrikou“ s produkciou približne 10^7 top kvarkových párov za jeden rok. Top kvark je najťažšia elementárna častica, ktorá má celý rad zaujímavých vlastností. Je to objekt, ktorý sa dá dobre popísať poruchovými metódami a rodí sa na veľmi malých vzdialenostiach ($\sim 10^{-18}$ m). Tým je vhodný na testovanie kvantovej chromodyna-

miky (QCD). Rozpadá sa predtým než hadronizuje, a svoje základné vlastnosti odovzdáva svojim rozpadovým produktom. Všetky tieto vlastnosti umožňujú skúmať základné symetrie Štandardného modelu. Preto je práve fyzika top kvarku je považovaná za okno pre skúmanie novej fyziky.

- Procesy s jetmi (jety sú priestorovo vymedzené výtrysky hadrónov vyvolané jedným kvarkom alebo gluónom) – štúdium týchto procesov nám umožňuje študovať prípadnú kompozitnosť kvarkov a leptónov – pritom bodovosť týchto častíc môže byť študovaná až do úrovne pod 10^{-19} m.
- Fyzika kvarku b a iné procesy Štandardného modelu – štúdium narušenia CP symetrie ($B^0 \rightarrow J/\psi + K_S^0$, $B^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$), oscilácií mezonov B_s^0 a iných procesov umožňuje skúmať také fundamentálne otázky ako je narušenie symetrie medzi časticami a antičasticami.

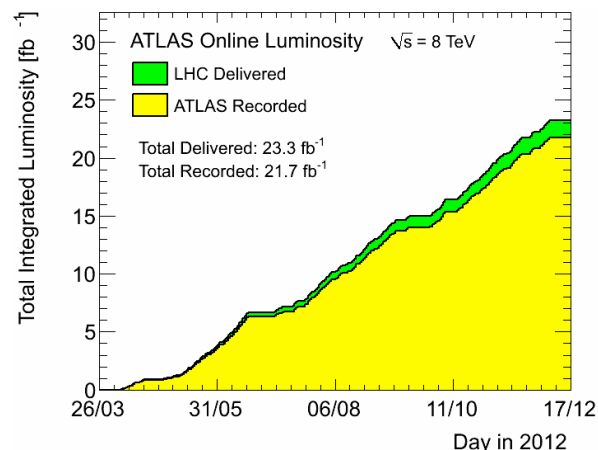
- Bezprostredné hľadanie javov indikujúcich rozšírenie Štandardného modelu:
- Hľadanie W a Z bozónov s pravotočivou chiralitou – ak namiesto symetrie $SU(2)_L$ obsahujúcej len častice s ľavotočivou chiralitou (predpokladá ju Štandardný model) sa v prírode realizuje $SU(2)_L \times SU(2)_R$, potom existujú aj intermediálne bozóny s pravotočivou chiralitou W_R a Z_R .
- Hľadanie supersymetrických partnerov častíc Štandardného modelu: skvarky, sleptóny, neutrálina a podobne. O neutrálne sa predpokladá, že to môže byť stabilná supersymetrická častica, a preto predstavuje kandidáta na tmavú hmotu. Nemalý záujem predstavuje aj štúdium rozšíreného Higgsového sektoru: $H^\pm$, H , h , A , či takých objektov, ako sú mikroskopické čierne diery – prejavy doplnkových dimenzií.

Výsledky experimentu ATLAS

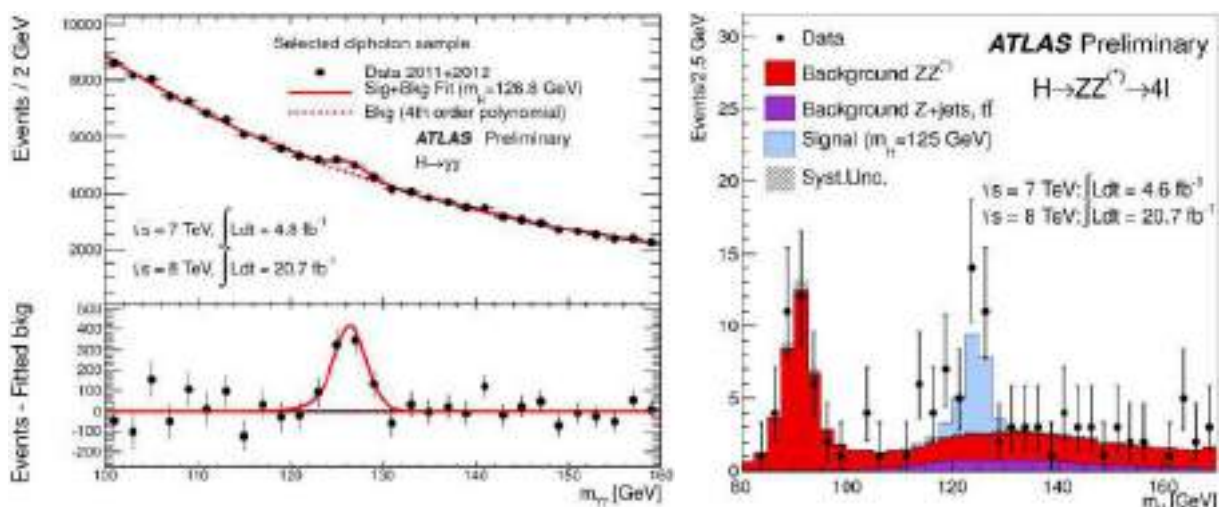
Experiment ATLAS fungoval od samého počiatku veľmi úspešne. Naberanie experimentálnych dát pokračovalo nad očakávanie dobre. Celková luminozita registrovaná v roku 2011 pri energii 7 TeV bola 5 fb^{-1} a v roku 2012 pri energii 8 TeV to bolo $21,7 \text{ fb}^{-1}$ (pozri obr. 5.2).

Najvýznamnejším výsledkom experimentu ATLAS je objav častice kompatibilnej s Higgsoým bozónom. Najvýraznejší prejav existencie Higgsového bozónu sa pozoroval v rozpadoch $H \rightarrow \gamma\gamma$ a $H \rightarrow ZZ^*(*) \rightarrow 4l$. Ako je vidieť z obr. 5.3, maximum v histograme invariantnej hmotnosti okolo 125 GeV je v oboch prípadoch jasne vidieť. Významnými sú aj výsledky vo fyzike top kvarkov zmeranie hmotnosti top kvarku, produkčného účinného prierezu (totálneho aj diferenciálneho),

pozorovanie takzvaného „single“ top kvarku (elektroslabá produkcia top kvarku) ako, aj zmeranie základných vlastností top kvarkov. Vysoko kvalitné výsledky boli získané aj v oblasti elektroslabých interakcií a v QCD. Ide predovšetkým o zmeranie dibozónovej produkcie (WW, WZ and ZZ), či produkcie W+jety, Z+jety a viacjetovej produkcie. Pri hľadaní novej fyziky ako sú supersymetrické častice, či prejavy pridaných rozmerov (KK-gluóny, mikroskopické čierne diery) boli nájdené nové hranice. Tie značne prekračujú hranice nájdené experimentmi na Tevatrone. Veľmi zaujímavé výsledky boli získané pri štúdiu Pb-Pb zrážok. Patrí medzi ne efekt potlačenia jetov či produkcia Z bozónu. Celkove je možné povedať, že doterajšie výsledky experimentu ATLAS rozširujú hranice platnosti Štandardného modelu, a tým posúvajú hranice pre novú fyziku, ktorá zatiaľ nebola pozorovaná.



Obr. 5.2 Naberanie experimentálnych dát v roku 2013 kolaboráciou ATLAS. Graf predstavuje je celkovú integrovanú luminozitu ako funkciu času



Obr. 5.3 Spektrum invariantných hmotností dvoch gama kvánt (vľavo) a štvorleptónová invariantná hmotnosť (vpravo)

Slovenské skupiny v kolaborácii ATLAS – historický pohľad

V roku 1994 sa ÚEF SAV a FMFI UK stali zakladajúcimi členmi kolaborácie ATLAS. Tomuto kroku predchádzali porady členov Oddelenia subjadrovej fyziky ÚEF SAV, prevažne členov kolaborácie H1, a kolegov z FMFI UK s niektorými čelnými predstaviteľmi manažmentu ATLAS, napríklad s prof. Jennim, s dr. Schmidtom, ale aj s riaditeľom Úradu pre stratégiu, rozvoja spoločnosti, vedy a výskumu Slovenskej republiky Ing. Ulrichom. Výsledkom týchto krokov bol návrh, ktorý predložili najvyššiemu riadiacemu orgánu kolaborácie, Rade kolaborácie (CB). V ňom navrhli kolaborácii vytvorenie klastra zloženého z pracovísk ÚEF SAV a FMFI UK s tým, že v CB obidve pracoviská budú mať len jeden hlas. Toto riešenie sa ukázalo ako prospešné – ušetrilo sa 100 000 CHF, ktoré predstavujú vklad jedného účastníka experimentu s právom jedného hlasu v CB. Navyše skupiny v ďalšom období zjednotili spoločné úsilie v snahe vyhovieť nárokom, ktoré boli zo strany kolaborácie na nich kladené.

Aktivity slovenského klastra sa prejavili aj v príprave technickej dokumentácie, napríklad v Technickom návrhu, Technickej správe k LAr kalorimetru, Technickej správe t Tile kalorimetru, a iným, ktoré vznikli v rokoch 1994 až 1996.

Memorandum o porozumení experimentu, základný právny dokument kolaborácie ATLAS, ktorý vznikol v roku 2002, bol za Slovenskú republiku podpísaný ministrom školstva M. Froncom. V Memorande sú detailne uvedené základné záväzky a povinnosti účastníkov kolaborácie.

Skupina z ÚEF SAV Košice

Košická skupina z ÚEF SAV svoju účasť v experimente ATLAS v podstate naštartovala participáciou v experimente H1 v DESY Hamburg, Nemecko, kde sa zamerala na kalorimetrický systém detektora H1, na takzvaný elektrónový spúšťač, a na fyzikálnu analýzu experimentálnych dát. Účasť v experimente H1 a spolupráca so skupinou Horsta Oberlacka z MPI Mníchov, sa ukázala ako rozhodujúca pre našu dnešnú participáciu v experimente ATLAS. Aktivita skupiny nezostali nepovšimnuté, a začiatkom roka 1990 sa stala členom projektu R&D 33 pod vedením H. Oberlacka. Šlo o návrh a vývoj nového typu kalorimetra schopného pracovať v podmienkach LHC, tzv. „Turbine Gap (TGT)“ kalorimetra. V hardvérovej časti tohto projektu navrhla skupina on-line (elektronickú) kalibračnú procedúru pre TGT, uskutočnila návrh a zrealizovala výrobu takzvanej sumačnej elektroniky. Z pohľadu fyzikálnej analýzy študovala možnosti TGT

bez elektromagnetickej časti pomocou Monte-Carlo simulácií s balíkom GEANT 3.21. Tento typ kalorimetra bol jeden z prvých vo svete, ktorý reálne použil takzvanú chladnú elektroniku, ktorá spracováva signál priamo vo vnútri kalorimetra, teda v podmienkach kvapalného argónu. Aj to bol jeden z hlavných vkladov košickej skupiny.



Obr. 5.4 Hadrónový End-Cap kalorimeter (HEC)

Úsilie vynaložené pri riešení projektu R&D 33 nebolo márne – na skupinu sa obrátil prof. Oberlack s návrhom spolupráce na návrhu, vývoji, testovaní a následnej prevádzke takzvaného hadrónového end-cap kalorimetra (HEC), ktorý je dnes súčasťou detektora ATLAS. Šlo o nemalý projekt, či už z pohľadu na jeho finančné krytie, ale aj na požiadavky, ktoré boli na neho kladené. Na projekte participovalo značné množstvo skupín z Nemecka, Kanady, USA a Ruskej federácie – vid' obr. 5.4. Hlavnou úlohou skupiny z ÚEF SAV bolo zabezpečenie on-line kalibrácie HEC detektora. Kolektív prispel do výstavby ATLAS detektora v nasledujúcich položkách:

1. Návrh, vývoj, realizácia, testy a následne údržba on-line (elektronickej) kalibrácie HEC detektora (J. Bán, P. Stríženec, E. Kladiva, D. Bruncko).
2. Doma vyrobil signálne a vysokonapäťové (HV) elektródy pre tento kalorimeter (E. Kladiva).
3. Navrhol, otestoval a do praxe zaviedol metodiku on-line kalibračnej procedúry. Dnes je jedným z pilierov tejto procedúry pre celú kalorimetriu

detektora ATLAS. Ilustráciou toho je napríklad, že dvakrát po sebe je jeden z členov ÚEF SAV (P. Stríženec) jedným z troch „convenorov“ pre túto oblasť v kolaborácii ATLAS.

4. Zrealizoval takzvanú „filter box“ elektroniku, elektroniku, ktorá slúži ako rozhranie medzi chladnou a teplou elektronikou, teda medzi prostredím v podmienkach kvapalného argónu a izbovej teploty (E. Kladiva).
5. Zrealizoval výrobu magnetickej ochrany LAr kalorimetra.
6. V úzkej spolupráci s Laboratóriami Nevis, Kolumbijská Univerzita, USA, významne prispel aj v elektronike pre celkovú kalorimetriu ATLAS – jednalo sa o vývoj, testy a následnú realizáciu takzvaných vyčítacích dosiek (J. Bán).
7. Pracoval aj na lokálnej hadrónovej kalibrácii kalorimetrov, hlavne kalorimetra HEC (P. Stríženec, P. Šťavina, M. Pécsy).

Dnes, okrem hlavného záväzku, on-line kalibrácii, sa zúčastňuje aj na fyzikálnej analýze, kde sa zameria hlavne na štúdium vlastností top kvarkov v dileptónovom kanáli v pp zrážkach pri 7 a 8 TeV, a to zvlášť na analýzu nábojovej asymetrie a na produkčný mechanizmus v tomto kanáli (J. Antoš, P. Stríženec, J. Urbán, D. Bruncko).

Skupina z FMFI UK Bratislava

Skupina fyzikov z MFF UK Bratislava spolupracovala s Christianom Fabjanom z Viedenskej univerzity. V lete 1992 prišiel do Bratislavy na návštevu MFF Peter Jenni, vedúci projektu EAGLE. Na základe jednania B. Sitára s P. Jennim skupina fyzikov z MFF vstúpila do experimentu EAGLE. V roku 1992 sa experimenty EAGLE a ASCOT zlúčili a experiment premenovali na ATLAS. Na tomto zasadnutí a hlasovaní sa za SR zúčastnil v CERN-e B. Sitár. V roku 1992, na základe začlenenia do ATLAS Letter of Intent (dokument CERN/LHCC/92-4) sa bratislavská a košická skupina stali zakladajúcimi členmi experimentu ATLAS. Za Slovensko tento dokument podpísali pracovníci ÚEF SAV (J. Bán, D. Bruncko, E. Kladiva, I. Králik a L. Šándor) a MFF UK (P. Chochula, M. Grendar, V. Hlinka, K. Holý, R. Janík, P. Kubinec, P. Lichard, L. Lúčan, J. Masarik, M. Pikna, P. Povinec, B. Sitár, P. Strmeň, I. Szarka, S. Tokár a J. Vanko). Skupina z MFF začala spolupracovať na vývoji detektora miónov (hlavne P. Lichard mladší). Neskôr však mala časť bratislavskej skupiny ambíciu rozvíjať MSGC a TPC detektory, a tak prijala ponuku kolaborácie ALICE a z ATLAS-u v roku 1994 odišla.

Súčasná bratislavská skupina (ATLAS-BA) sa postupne formovala okolo S. Tokára, ktorý sa spo-

lupracujúc s SÚJV Dubna a INFN Pisa zapojil do vývoja Tile-kalorimetra (Tilecal), ktorý dnes vyplňa centrálnu časť kalorimetrického systému detektora ATLAS. Tilecal predstavoval, rovnako ako HEC, širokú medzinárodnú spoluprácu kolektívov z Českej republiky, Ruskej federácie, Španielska, Talianska, Brazílie, USA, Bieloruska a ďalších krajín. Ide sa o vzorkovací kalorimeter, ktorého aktívne médium tvoria scintilátorové dosičky, pasívne médium je tvorené železnými platňami a svetelný signál sa z scintilátorových dosičiek sníma pomocou svetelných vlákien a je detegovaný fotonásobičmi.

Skupina, do ktorej sa postupne pripojili P. Šťavina, I. Sýkora a celý rad študentov a doktorandov (G. Krajčovič, I. Fedorko, R. Garabík, P. Holík, T. Ženiš, M. Čiljak, M. Jurčovičová) sa zaoberala testami fotonásobičov, kde vyvinula špeciálnu jedno-fotoelektrónovú metódu analýzy signálu z fotonásobiča. Táto metóda bola publikovaná s veľmi dobrým ohlasom. Skupina sa postupne zapojila do testov prototypov a neskôr modulov hadrónového Tile-kalorimetra. V tejto fáze, ktorá zahŕňala roky 1995 až 2003 sa nielen podieľala na zmenách pri testoch spomínaných prototypov a neskôr aj modulov kalorimetra, ale aj na rekonštrukcii experimentálnej informácie, predovšetkým na rekonštrukciu signálu piónov. Analyzovala závislosť energetického rozlíšenia kalorimetra od energie a uhla dopadu incidentnej častice. Tieto výsledky vošli do základných publikácií týkajúcich sa hadrónového tile-kalorimetra. V záverečnej fáze pred spustením LHC sa venovala montáži, testom a uvádzaniu do prevádzky jednotlivých modulov kalorimetra, ako aj kalorimetra ako celku. Veľa úsilia venovala aj miónovým testom kalorimetra a softvéru týkajúceho sa monitoringu dát z Tilecalu. V tejto fáze sa začala venovať aj analýze fyzikálnych procesov na základe nasimulovaných dát. Orientovala sa tiež na procesy fyziky top kvarku. V tejto fáze, popri pracovníkoch z predchádzajúceho obdobia, prišli noví mladí ľudia, z ktorých je treba sa zmieniť hlavne o nasledovných študentoch a doktorandoch: P. Bednář, J. Šutiak, P. Kadlečík, Ľ. Lovás, P. Federič, L. Bábková, R. Astaloš a L. Plazák. Výsledky jej prác z tohto obdobia vošli do základných publikácií kolaborácie ATLAS týkajúcich sa možnosti detektora ATLAS vo vzťahu k fyzikálnym procesom ako aj testov hadrónového tile-kalorimetra.

Po spustení LHC vznikla prirodzene potreba dohľadu nad procesom uchovávaní a prvotného spracovania získaných údajov. Na detektore ATLAS sa podieľame na dohľade nad distribúciou dát do celosvetovej siete WLCG. Z vrcholnej úrovne v CERN-e (najvyšší uzol siete, Tier 0) do vedec-

kých inštitúcií po celom svete tvoriacich uzly na nižších úrovniach (uzly typu Tier 1 a Tier 2). Tiež sa podieľame aj na dohľade nad prvotným spracovaním týchto dát v sieti WLCG (P. Stríženec a T. Blažek).

Výchovno-vzdelávací proces

Účasť v experimente ATLAS mala a má vysoko pozitívny dopad na pedagogický proces a vzdelávanie mladých vedeckých pracovníkov. Naši mladí vedeckí pracovníci, doktorandi a študenti majú možnosť učiť sa od najlepších svetových odborníkov, spolupracovať a konfrontovať svoje názory s talentovanými mladými ľuďmi z celého sveta. Celkovo bolo členmi slovenského klastra od začiatku existencie kolaborácie ATLAS 11 doktorandov, z ktorých 5 obhájilo dizertáciu na základe tém z experimentu ATLAS (I. Fedorko, M. Čiljak, T. Ženiš, M. Pécsy, P. Federič). Ďalší sa síce obhájili inde, ale získali svoje skúsenosti v experimente ATLAS (P. Šťavina, P. Bednár, M. Jurčovičová, J. Šutiak, P. Kadlečík, Ľ. Lovás). Okrem toho bolo na tému z experimentu ATLAS úspešne obhájených 13 diplomových prác a len za posledné 3 roky 9 bakalárskych prác.

Počas našej dlhoročnej účasti v experimente sme na Slovensku realizovali dve pracovné stretnutia, v roku 2000 na Sninských rybníkoch a v roku 2004 v Tatranskej Štrbe. K našej popularizačnej činnosti neoddeliteľne patrí aj organizácia výstavy „Pohľad do mikrokozmosu“, ktorú sme realizovali v Košiciach, Bratislave, Banskej Bystrici, Žiline a v Prešove, ako aj celý rad vystúpení v slovenských médiách.

6 Štúdium hmoty v extrémnych podmienkach v experimente ALICE

Primárnym cieľom experimentálneho komplexu ALICE na LHC je štúdium jadrovej hmoty v extrémnych podmienkach (vysoká teplota, tlak, hustota energie...), kde dochádza k fázovému prechodu jadrovej hmoty do stavu kvarkovo-gluónovej plazmy. Sledovanie procesov prebiehajúcich v zrážkach jadier olova dovoľuje nazrieť hlboko do procesov vyvolaných silnou interakciou a uvidieť hmotu v tom stave, v akom sa nachádzala v prvých mikrosekundách po Veľkom tresku. Fyzikálny program tiež obsahuje štúdium zrážok protónov s protónmi a jadrami.

História budovania detektora ALICE

Prvé myšlienky o tom ako študovať zrážky ťažkých iónov, v ktorých sa očakával fázový prechod

Inovácia detektora ATLAS

Skupina ÚEF SAV sa už roky zúčastňuje programu, cieľom ktorého je príprava detektora, v tomto prípade LAr kalorimetra, pre obdobie zvýšenej svietivosti zväzkov LHC. Základnou úlohou je na tieto podmienky pripraviť predovšetkým kalorimeter, ktoré stoja v ceste zväzku, a preto budú vystavené značnej radiačnej záťaži. Jedná sa o takzvaný predný, najbližší k zväzku (FCAL), hadrónový (HEC) a elektromagnetický (EMEC) kalorimeter. Za týmto účelom sme najskôr v rámci programu INTAS spolupracovali so skupinami z MPI Mníchov, University of Arizona, Universität Mainz, SÚJV Dubna, FIAN Moskva a ÚFVE Protivno na projekte, cieľom ktorého bolo zistiť radiačnú odolnosť týchto zariadení a následne ich modifikovať na zvýšenú svietivosť. Predbežné výsledky týchto aktivít budú predstavovať jeden zo základných prvkov v druhej fáze inovácie kalorimetrov v rokoch 2016 až 2018.

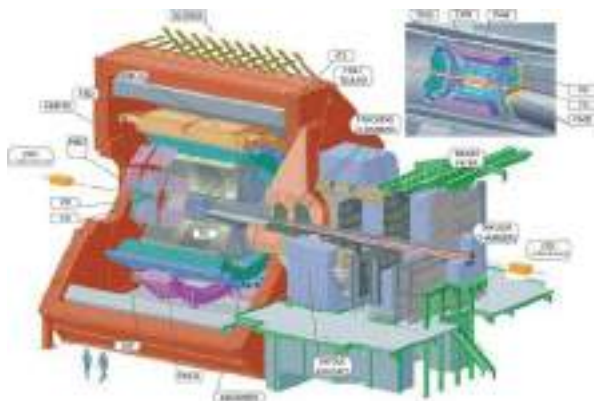
Praktický prínos

Naša prítomnosť má aj iné bezprostredné praktické dôsledky. Naša účasť v experimente ATLAS jednoznačne prispela k tomu, že slovenské firmy získali významné zákazky spojené s budovaním detektora ATLAS, prípadne urýchľovača LHC. Napr. ZŤS Dubnica bola dodávateľom železných platní pre hadrónový Tile-kalorimeter, OSVOKov Prešov dodal zdvíhacie rameno pre manipuláciu s kalorimetrickými modulmi, čo bezprostredne súviselo s našou aktivitou v Tilecale. Pomimo toho VVÚ ZŤS Košice získali zákazku na zariadenia pre polohovanie magnetov – čo je vysoko-technologická záležitosť.

jadrovej hmoty na stav nazývaný kvarkovo-gluónová plazma, na novom urýchľovači LHC plánovanom v CERN-e, boli prezentované v októbri 1990 na konferencii *Large Hadron Collider Workshop* v Aachene v Nemecku. V tom čase boli najťažšími iónmi urýchlennými v CERN-e jadrá síry 7 krát ľahšie ako očakávané jadrá olova a maximálna energia zrážky predstavovala iba 3 promile z tej, ktorú mal poskytnúť LHC. Niekoľko realistických konceptov takéhoto experimentu bolo predstavených na konferencii „Towards the LHC Experimental Programme“ vo francúzskom Eviane v marci 1990. Jedným z nich bol aj dokument „Expression of Interest: A dedicated heavy ion experiment at the LHC“ prednesený Jürgenom Schukraftom, ktorý neskôr viedol budovanie detektora ALICE.

Pokračovalo upresňovanie požiadaviek na novú aparaturu, hľadanie a skúšanie nových technológií. Prebiehalo aj formovanie medzinárodnej kolaborácie a v roku 1993 bol vydaný dokument *Letter of Intent for A Large Ion Collider Experiment*, – ALICE. V zozname záujemcov sa objavili aj Ústav experimentálnej fyziky SAV a Univerzita P. J. Šafárika v Košiciach. Celkovo 42 ústavov z celého sveta vyjadrilo seriózny záujem o využitie potenciálu LHC v oblasti skúmania hmoty v extrémnych podmienkach.

Detailný technický návrh s názvom „ALICE: Technical Proposal for A Large Ion Collider Experiment at the LHC“ bol publikovaný v roku 1995 a v zozname zainteresovaných pracovísk sa objavila tiež Fakulta matematiky, fyziky a informatiky Univerzity Komenského v Bratislave. Experiment ALICE bol manažmentom CERN-u schválený 14. februára 1997 a pristúpilo sa k príprave podrobnej dokumentácie technických riešení „Technical Design Reports“ v rokoch 1998–2005.



Obr. 6.1 Schéma experimentu ALICE na LHC v CERN-e

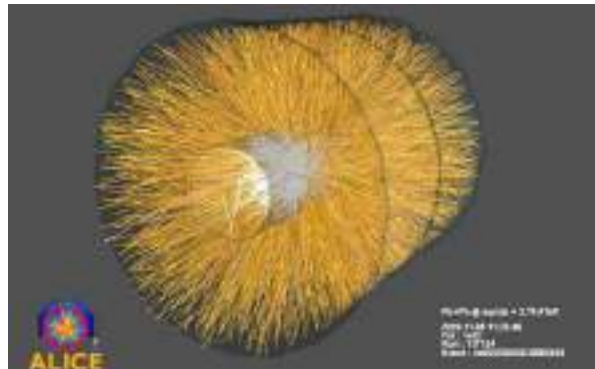
Závazky slovenských pracovísk boli podpísané ministrom školstva v zmluve „*Memorandum of Understanding for Collaboration in Construction of the ALICE Detector (MoU ALICE)*“ 27 novembra 2000. Ďalší dokument, „*Memorandum of Understanding for Maintenance and Operation of the ALICE Detector*“ definujúci záväzky Slovenska a CERN-u pre obdobie prevádzky experimentu, bol podpísaný ministrom školstva SR dňa 26. novembra 2002.

S budovaním samotného detektora ALICE sa začalo v roku 2000. Posledný detektor – elektromagnetický kalorimeter – bol nainštalovaný až v novembri 2011. Od konca novembra 2009 až do polovice februára 2013 boli aktívne zbierané a spracovávané údaje o zrážkach p-p, Pb-Pb a p-Pb a ich fyzikálna analýza bude pokračovať aj v najbližších rokoch. V rokoch 2013–14 dôjde k vylepšeniu vlastností niektorých podsystemov tak, aby bol celý komplex ALICE pripravený na výzvy, ktoré

prinesú zrážky v LHC pri vyššej energii od roku 2015.

Opis experimentálneho komplexu ALICE

Experiment ALICE (obr. 6.1) pozostáva z 18 detektorových systémov. Zvolené technologické riešenia boli diktované požiadavkami na čo najpresnejšie meranie hybností častíc a ich identifikáciu pri extrémne vysokých počtoch častíc očakávaných pri najvyšších energiách LHC (obr. 6.2).



Obr. 6.2 Prípád zrážky Pb-Pb pri energii 2,76 TeV zaregistrovaný detektorom ALICE. Stopy častíc vo vnútornej časti zobrazenia produktov interakcie sú zobrazené pomocou „IROC“ komôr vyrobených na FMFI UK v Bratislave

V centrálnej časti, pokrývajúcej uhly od 45° do 135° merané od osi zväzku, sa nachádzajú detektory schopné presne merať hadróny, elektróny a fotóny. Najbližšie k miestu zrážky je umiestnených 6 koncentrických valcových vrstiev vnútorného dráhového detektora ITS osadených kremíkovými pixelovými, driftovými a mikrostripovými detektormi. Ich úlohou je veľmi presné určenie miest rozpadu krátkožijúcich častíc. Polomer vrstvy najbližšej k zväzku je 3,9 cm a najvzdialenejšej 43 cm. Detektor obsahuje 12,6 miliónov meračích elementov. Centrálny dráhový detektor, schopný zmerať aj 10 000 stôp nabitých častíc vo svojom citlivom objeme, sa nazýva časovo-projekčná komora (Time Projection Chamber – TPC). Pracovný objem komory má vnútorný polomer 85 cm, vonkajší 250 cm, dĺžku 500 cm a je naplnený 90 m^3 pracovného plynu. Nabité častice zanechávajú v aktívnom objeme ionizačné stopy, ktoré TPC dokáže zrekonštruovať v trojrozmernom priestore. Z veľkosti ionizačného signálu je možné určiť typ častice.

Pre rôzne hybnosti častíc sa používajú rôzne metódy ich identifikácie. Na získanie kompletnej informácie o identite častíc je inštalovaných niekoľko navzájom sa dopĺňajúcich detekčných systémov. Využíva sa presné meranie času potrebného na prekonanie známej vzdialenosti v systéme TOF s rozlíšením lepším ako 100 ps. V detektore HMPID sa na identifikáciu častíc využíva Čerenkov-

ské žiarenie. V ďalšom detektore TRD sa meria prechodové žiarenie. Tieto detektory poskytujú informácie, na základe ktorých sa dajú vzájomne rozlíšiť protóny, pióny, kaóny a elektróny.

Elektricky neutrálne fotóny sú registrované v elektromagnetických kalorimetroch, kde fotón vyvolá elektromagnetickú spršku, ktorá v citlivom objeme detektora vyvolá signál úmerný energii prvotného fotónu. Uložené sú ďaleko od bodu zrážky (4,6 m), aby sa vysporiadali s vysokou hustotou častíc. V ALICE sú inštalované fotónový spektrometer PHOS s vysokým energetickým a priestorovým rozlíšením a elektromagnetický kalorimeter EMCAL s hrubšou granularitou a horším energetickým rozlíšením ale zato pokrývajúcim väčšiu plochu (46 m² u EMCAL oproti 8,6 m² u PHOS). Granulita kalorimetrov dovoľuje určiť okrem energie aj smer letu fotónov.

Všetky spomínané detekčné systémy sú uložené vnútri veľkého solenoidálneho magnetu s vnútorným priemerom 11 m a dĺžkou 14 m. Maximálna indukcia magnetického poľa je 0,5 T. Zo zakrivenia dráh nabitých častíc (meraných v ITS, TPC a TRD) sa určujú ich hybnosti.

Na vonkajšej strane magnetu, vo vzdialenosti 6,5 m od bodu zrážky sa nachádza 60 modulov detektora ACORDE určeného na detekciu vysokoenergetického kozmického žiarenia, schopného preniknúť do hĺbky viac ako 100 m pod zemský povrch. Tieto extrémne energetické častice sa využívajú jednak na ladenie aparatury pred spustením urýchľovača a jednak sú určené k samostatnému štúdiu vysokoenergetickej zložky kozmického žiarenia.

Na jednej strane ALICE mimo centrálnej časti je asymetricky umiestnený miónový spektrometer. K identifikácii miónov sa využíva ich schopnosť prenikať hrubou vrstvou materiálu, ktorá pohltí všetky ostatné častice. Vo vzdialenosti 90 cm od bodu zrážky v smere zväzku sa začína 4,13 m dlhý absorbátor zhotovený prevažne z uhlíka a betónu. Za absorbátorom je umiestnený dipólový magnet poskytujúci magnetické pole s indukciou 0,666 T nasledovaný veľkoplošnými komorami na meranie dráh miónov, železnou stenou hrubou 1,2 m, a detektormi na rýchly výber prípadov s miónmi. Vysoká selektívnosť systému výberu dovoľuje študovať málo pravdepodobné procesy, v ktorých sa rodia ťažké kvarky, ktoré sa potom rozpadajú na miónové páry.

Celý komplex ALICE je doplnený ešte menšími detektormi uloženými blízko osi zväzku určenými k identifikácii prípadov, kde došlo k interakcii, prípadne k určovaniu centrality zrážok, ktorých sa zúčastňujú ťažké jadrá (Pb-Pb, p-Pb). Aparatúru dopĺňajú ďalšie systémy na výber zaujímavých

prípadov, na vyčítavanie informácie z jednotlivých detektorov a jej uloženie, na riadenie celého komplexu a monitorovanie jeho funkcií. Dáta z experimentu sú uchovávané a spracovávané tisíckami počítačov vzájomne prepojenými v sieti WLCG, geograficky rozmiestnenými po celom svete (podrobnejšie v kapitole 1). Kapacita, ktorou dnes Slovensko k týmto výpočtom prispieva, predstavuje 3 % celového výkonu.

Modernizácia experimentu ALICE

Aj keď zber dát v rokoch 2009 až 2013 ukázal, že experiment ALICE úspešne plnil všetky požiadavky naň kladené a osvedčil sa pri štúdiu zrážok p-p, Pb-Pb a p-Pb v rozsahu energií zrážok od 900 GeV do 8 TeV, plánované zvýšenie prevádzkových parametrov LHC (vyššia intenzita zväzkov, vyššie energie, vyššia frekvencia zrážok) bude vyžadovať modernizáciu vybraných subsystémov alebo ich častí. Modernizácia ALICE bude prebiehať v dvoch etapách.

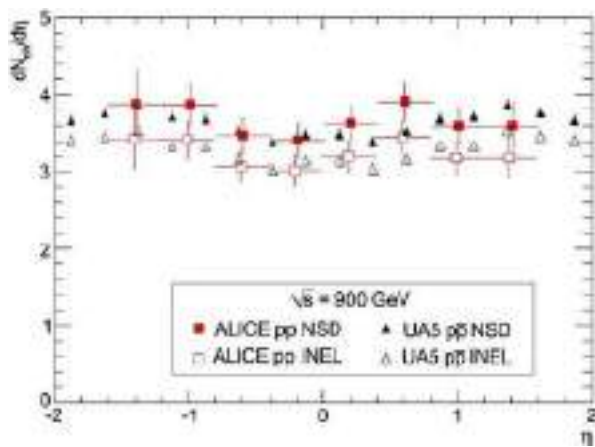
Prvú etapu modernizácie bude predstavovať príprava na druhý zber dát, pri ktorom má LHC dosiahnuť svoju maximálnu energiu 14 TeV, ktorý začne v roku 2015. Očakáva sa rozšírenie funkcionality centrálneho rozhodovacieho procesora CTP, rozšírenie systému na monitorovanie svietivosti zväzku, zefektívnenie softvéru na hromadné spracovanie a analýzu dát. Druhá etapa modernizácie, plánovaná na rok 2018, bude predstavovať výmenu celých detektorových podsystémov, prípadne inštaláciu nových.

Hlavné fyzikálne výsledky experimentu ALICE

Prvé fyzikálne výsledky z LHC

23. novembra 2009 v LHC po prvý raz začali cirkulovať dva protiběžné zväzky protónov s energiou 450 GeV. Hoci intenzita protónov bola veľmi malá a geometria zväzkov nebola nijak optimalizovaná, všetky experimenty na LHC zaregistrovali stopy prvých zrážok. Aby sa predišlo možnému poškodeniu citlivých detektorov pri nie veľmi vyladených zväzkoch, aktívne boli iba vybrané podsystémy ALICE: kremíkový centrálny dráhový detektor ITS a scintilačné detektory využívané centrálnym rozhodovacím procesorom CTP. Magnetické pole bolo vypnuté. V priebehu 43 minút sa podarilo zaznamenať 284 prípadov. Dátová vzorka bola použitá na určenie počtov nabitých častíc vyletujúcich kolmo na smer letu zrážajúcich sa protónov (Obr. 6.3). Vďaka tomu, že analyzačné postupy boli dopredu odladené a preverené, výsledky mohli byť zaslané do tlače už 1. decembra

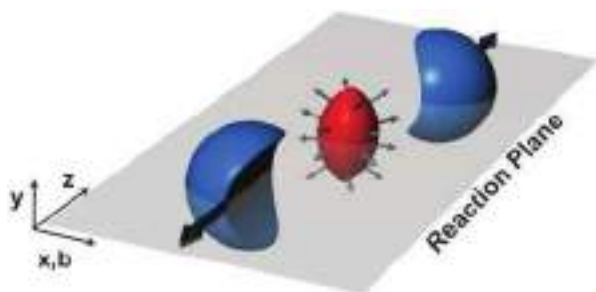
2009. Na tomto úspechu má veľkú zásluhu Karel Šafařík. Práca bola publikovaná European Physical Journal C65 (2010) 111-125 a je na ňu už viac ako 70 citácií.



Obr. 6.3 Prvé výsledky z LHC publikované experimentom ALICE v European Physical Journal C65, str. 111-115, publikované v 2012. Na grafe je závislosť počtu nabitých častíc od pseudorapidity

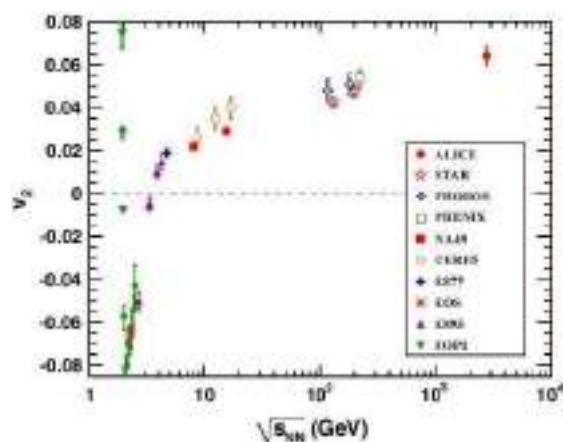
Hydrodynamika kvarkovo-gluónovej plazmy a eliptický tok

Cieľom skúmania zrážok ťažkých jadier pri ultrarelativistických energiách je vytvorenie a štúdium kvarkovo-gluónovej plazmy (QGP), stavu hmoty, ktorého existencia bola predpovedaná teóriou silných interakcií – kvantovou chromodynamikou. Štúdium kolektívneho toku častíc v zrážkach Pb-Pb poskytuje informácie o transportných vlastnostiach hmoty vytvorenej v zrážke dvoch ťažkých jadier. Najvýraznejšou experimentálnou signatúrou kolektívneho toku je uhlová anizotropia častíc zrodených v zrážke. Tá je prejavom mnohonásobných interakcií medzi časticami horúcej hmoty a priestorovej anizotropie silno vzburdeného počiatočného stavu (obr. 6.4). Druhý Fourierov koeficient azimutálneho rozdelenia (druhá harmonická) je známy ako eliptický tok.



Obr. 6.4 Objem stlačenej a horúcej hmoty v necentrálnej zrážke dvoch ťažkých jadier má tvar šišky (červená oblasť). Priestorová anizotropia v reakčnej rovine x-z sa pretransformuje na anizotropiu kolektívneho toku častíc vylietavajúcich z reakcie (Zdroj: R. Snellings, New Journal of Physics 13 (2011) 055008)

Veľkosť eliptického toku silne závisí od vnútorného trenia (viskozity) vzniknutej hmoty a dovoľuje rozlíšiť medzi „dobrými“ kvapalinami s vlastnosťami podobnými vode (malé trenie) vytvárajúcimi



Obr. 6.5 Integrovaný eliptický tok meraný experimentom ALICE v zrážkach Pb-Pb pri energii 2,76 TeV na nukleón porovnaný s hodnotami získanými pri nižších energiách

vlny a „zlými“ kvapalinami, podobnými medu, kde vlny veľmi rýchlo zanikajú. Výsledky ALICE pri energii zrážky Pb-Pb 2,76 TeV na každý zrážajúci sa nukleón-nukleónový pár potvrdili zistenia z RHIC, že hustá a horúca hmota produkovaná v týchto zrážkach má vlastnosti takmer ideálnej kvapaliny s veľmi malou viskozitou. Porovnanie hodnôt eliptického toku pri rôznych energiách dovoľuje študovať teplotnú závislosť hydrodynamických parametrov QGP (obr. 6.5). Tento výsledok ALICE tiež demonštroval, že kolektívne javy v zrážkach ťažkých jadier môžu byť na LHC vďaka vysokej početnosti produkovaných častíc študované s bezprecedentnou presnosťou. Práca, publikovaná v Physical Review Letters 105 (2010) 252302 je zatiaľ najcitovanejšou prácou kolaborácie ALICE s 150 citáciami.

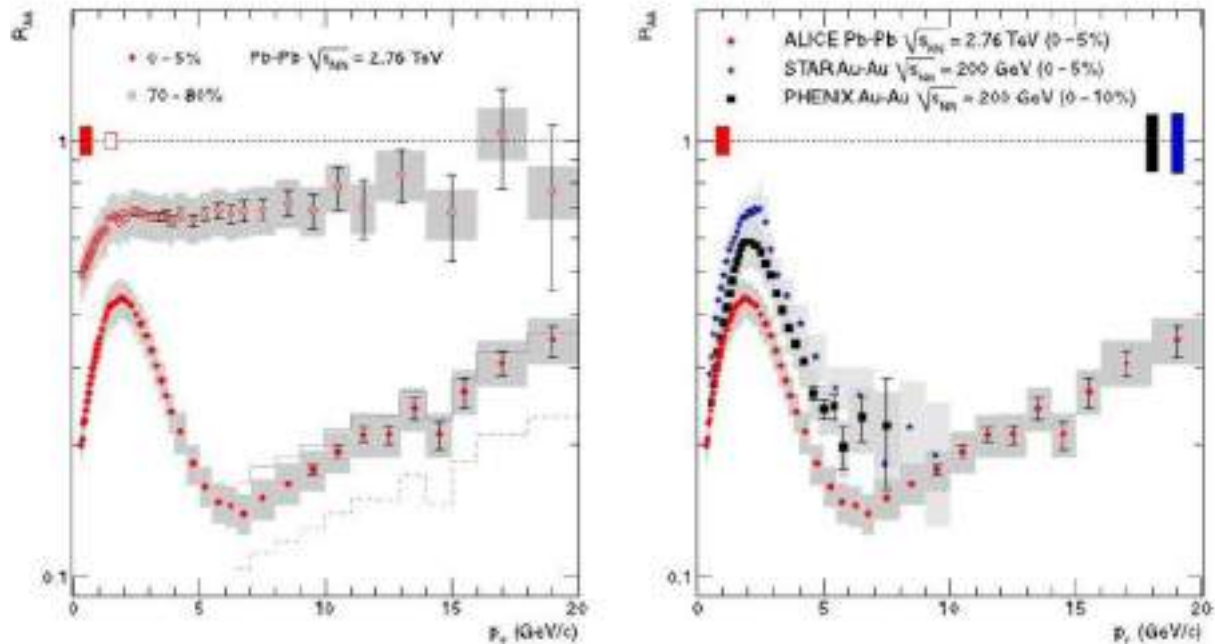
Energetické straty partónov v hustom prostredí QGP

Keď sa rýchle partóny (kvarky a gluóny), produkované v zrážkach ťažkých iónov, pohybujú v hustom prostredí (kvarkovo-gluónová plazma), postupne strácajú energiu pružnými zrážkami s partónmi prostredia alebo vyžarovaním gluónov (silný analóg brzdného žiarenia z elektrodynamiky). Stopy týchto rýchlych partónov sú pozorované ako prúd častíc letiaci v smere pôvodného partónu. Veľkosť energetických strát je závislá od hustoty prostredia a od dĺžky dráhy, ktorú partón v prostredí preletí (a teda aj na veľkosti „kvapky“ QGP).

Jednou z možností merania energetických strát partónov je porovnanie počtu nabitých častíc s danou hodnotou prieknej zložky hybnosti (pre častice

vyletujúce kolmo na smer zväzku priečna zložka hybnosti zodpovedá energii), pozorovaných v zrážke Pb-Pb (rýchle partóny tu „cítia“ husté horúce prostredie QGP) a rovnakej veličiny meranej v zrážkach p-p (rýchle partóny letia vo vákuu) vynásobenej počtom nukleón-nukleónových zrážok zodpovedajúcim centralite zrážky Pb-Pb (odhad pre Pb-Pb bez vplyvu hustého prostredia). Pomer týchto dvoch veličín, nazývaný jadrový modifikačný faktor, ur-

čený v závislosti na priečnej zložke hybnosti, dáva predstavu o hustote QGP: hodnoty blízke 1 predstavujú riedke prostredie, hodnoty omnoho menšie ako 1 poukazujú na hustú plazmu. (obr. 6.6) Porovnanie výsledkov ALICE s výsledkami experimentov na RHIC naznačuje, že na LHC sa podarilo dosiahnuť vyššiu hustotu QGP. Práca bola publikovaná v časopise Physics Letters B 696 (2011) 30-39.



Obr. 6.6 Ľavý graf predstavuje jadrový modifikačný faktor meraný pre dve hodnoty centrality zrážky Pb-Pb (0–5 % sú najcentrálnejšie zrážky s veľkým počtom interagujúcich nukleónov a s najvýhodnejšími podmienkami na vznik QGP, 70–80 % sú periférne zrážky kde počet interagujúcich nukleónov je malý). Pravý graf ukazuje porovnanie jadrových modifikačných faktorov meraných v ALICE s meraniami na urýchľovači RHIC pri asi desaťkrát nižšej energii zrážky

Meranie teploty QGP – štúdium produkcie priamych fotónov

Jedným z klasických signálov QGP je vyžarovanie „termálnych fotónov“, ktorých spektrum odráža teplotu systému. Vďaka tomu, že ich schopnosť interagovať v hustom prostredí QGP je zanedbateľná, tieto fotóny opúšťajú reakčnú zónu neovplyvnené prostredím a umožňujú priamo „vidieť“ rannú horúcu fázu zrážky ťažkých jadier. Avšak termálne fotóny sú produkované počas celej histórie rozpínania a chladnutia QGP. V zrážkach Pb-Pb pri energii 2,76 TeV na každý zrážajúci sa nukleón-nukleónový pár sa očakáva, že termálne fotóny budú predstavovať dominantný príspevok do spektra fotónov pri malých energiách fotónov (menej ako 5 GeV/c).

Skutočnou výzvou pre experimentátorov je správna eliminácia obrovského pozadia fotónov z rozpadov neutrálnych piónov. Ďalším zdrojom

netermálnych fotónov je produkcia priamych fotónov (nie z rozpadov) vznikajúcich pri rozptyle partónov v počiatočných fázach zrážky Pb-Pb.

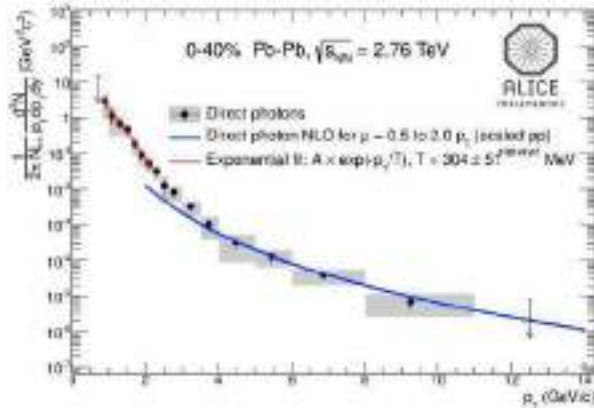
Po oddelení všetkých príspevkov bolo získané spektrum termálnych fotónov, z ktorého sa podarilo určiť teplotu horúcej plazmy 304 ± 51 MeV (t.j. $3,5 \times 10^{12}$ K), (obr. 6.7). Táto hodnota je vysoko nad hodnotou kritickej teploty 150–160 MeV ($1,8 \times 10^{12}$ K) potrebnej na fázový prechod jadrovej hmoty do stavu QGP. Práca bola zaslaná do časopisu Nuclear Physics A, dostupná je ako preprint ArXiv: 1210.5958v2 [hep-ex].

Kolaborácia ALICE produkuje veľké množstvo vysoko kvalitných fyzikálnych výsledkov, ktoré sú publikované v najprestížnejších fyzikálnych časopisoch. V roku 2012 to bolo 25 publikácií v renomovaných zahraničných časopisoch, 75 príspevkov na medzinárodných konferenciách.

Bratislavská skupina na experimente ALICE

Príprava na vstup do experimentu ALICE

Bratislavská skupina v zložení Branislav Sitár (vedúci skupiny), Vladimír Hlinka, Karol Holý, Miroslav Pikna a Imrich Szarka sa zapojila v rokoch 1992 – 1994 do vývojového projektu CERN RD-28



Obr. 6.7 Spektrum fotónov nepochádzajúcich z rozpadov hadrónov merané v zrážkach Pb-Pb pri energii zrážky 2,76 TeV na nukleón-nukleónový pár. Modrou čiarou je vyznačený príspevok z nepružného rozptylu partónov, červená čiara zobrazuje príspevok od termálnych fotónov, pomocou ktorého bola určená teplota kvarkovo-gluónovej plazmy na $3,5 \times 10^{12}$ K

vedeného Fabiom Saulim. Projekt bol zameraný na vývoj mikrostripových plynových detektorov (MSGC). Od roku 1993 skupina v zložení Branislav Sitár (vedúci skupiny), Rudolf Janik (†2012), Peter Strmeň, Miroslav Pikna, Imrich Szarka a doktorand Marián Ivanov na MFF UK v Bratislave navrhla a vyrobila nový systém čítania informácií z katód časovo-projekčnej komory (Time Projection Chamber – TPC) na báze takzvaných C-padov. V spolupráci so Strojníckou fakultou STU Bratislava bola vyvinutá metóda presného kovania hliníka za studena. Bol vyrobený prototyp zariadenia na výrobu katódových C-padov touto metódou. Vývoj bol úspešný a dosiahla sa požadovaná kvalita a presnosť. Ďalej bol vyrobený a odskúšaný prototyp TPC s C-padmi v laboratóriu, ktorý bol úspešne testovaný v Bratislave, v GSI Darmstadt a v CERN-e. Bratislavská skupina vyvinula aj nový čítací (read-out) systém TPC na báze C-padov z tenkých kaptónových fólií. Bola vybudovaná elektronická aparatura na testovanie čítania informácie z TPC a boli vytvorené súbory programov na simuláciu fyzikálnych procesov v TPC. Pomocou simulácií skupina získala dôležité poznatky o pohybe elektrónov a iónov v komore a o ich vplyve na tvorbu signálu TPC ALICE. V spolupráci s GSI Darmstadt bolo navrhnutých a vyrobených niekoľko malých proporcionálnych komôr typu IROC pre TPC ALICE.

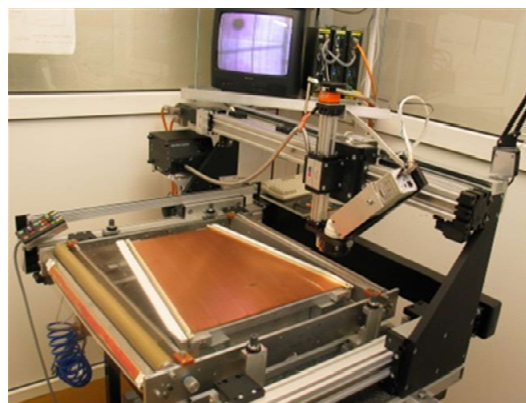
Bratislavská skupina zároveň spolupracovala so skupinou Hansa Georga Fischera v CERN-e, ktorá vyvíjala ďalší systém čítania informácií z katód časovo-projekčnej komory TPC na báze tzv. „ring cathode“. Na tomto vývoji sa z Bratislavy podieľali predovšetkým M. Pikna a doktorand Michal Kreps. V CERN-e najprv vyrobili komôrku s posuvným driftom pre zmeranie funkcie odozvy (Pad Response Function – PRF) pre „ring cathode“ alebo „C-pad“ čítanie TPC komôr.

Po vstupe bratislavskej skupiny do experimentu ALICE v roku 1995 B. Sitár dohodol s vedúcim skupiny ALICE TPC Petrom Braun-Munzingerom z GSI Darmstadt, že sa bratislavská skupina zúčastní na vybudovaní, montáži a prevádzke čítacích komôr (IROC) pre centrálny detektor ALICE-TPC. Kolaborácia TPC ALICE zverila túto veľmi náročnú výrobu laboratóriám v GSI Darmstadt, na Univerzite v Heidelbergu a na FMFI UK v Bratislave. Časovo-projekčná komora TPC ALICE je najväčším a najzložitejším zariadením svojho druhu na svete. Tento detektor dokáže rekonštruovať a identifikovať až 10 000 stôp častíc, ktoré vzniknú v jednej interakcii ťažkých iónov pri energii LHC 2×7 TeV.

Vývoj, výroba a testovanie čítacích komôr pre TPC ALICE

Za účelom produkcie vnútorných čítacích komôr (IROC) pre TPC ALICE bolo v priestoroch FMFI UK Bratislava vybudované a prevádzkované detektorové laboratórium obsahujúce čisté priestory. IROC komory sú technicky veľmi náročným detektorom. Každá IROC komora obsahuje 800 vlákien s priemerom 0,02 resp 0,075 mm, ktoré boli uložené s presnosťou 0,02 mm. V priestoroch detektorového laboratória skupina zostrojila navijací aparát, ktorý zaručoval rovnomerné napnutie vlákien na lepšej úrovni akú dosiahli v GSI. V laboratóriu bola zostrojená aparatura na presné ukladanie vlákien do IROC komôr (obr. 6.8). Bol vyvinutý a testovaný optický systém kontroly parametrov proporcionálnych komôr dosahujúci presnosť 0,01 mm. Boli vyrobené tri prototypy komôrok typu IROC, testy potvrdili ich dobrú kvalitu.

V detektorovom laboratóriu bolo zostrojených 26 IROC komôr pre TPC ALICE. Vytvorenie jednej IROC komory predstavovalo 250 operácií, ktoré všetky museli byť prevedené bezchybne. Bola zmeraná poloha a napätie každého vlákna. Dosiahnutá homogenita uloženia a napätia vlákien predčila parametre, ktoré boli dosiahnuté v GSI. Bolo vybudované testovacie zariadenie, na ktorom boli premerané všetky potrebné parametre IROC komôr



Obr. 6.8 Výroba IROC detektorov na FMFI UK v Bratislave, vľavo navíjacia aparátúra, vpravo zariadenie na skladanie IROC detektorov

v dlhodobých testoch v dĺžke 50 hodín (obr. 6.9). Všetky komory splnili kritériá testov. Postup prác a výsledky testov boli pravidelne prezentované na seminároch kolaborácie TPC ALICE v CERN-e alebo GSI Darmstadt. V roku 2005–2007 boli IROC komory namontované v CERN-e do TPC ALICE s účasťou bratislavskej skupiny, hlavne M. Piknu a doktoranda Martina Šišku (obr. 6.10). V rokoch 2007–2008 v CERN-e prebehli testy TPC a elektronickej aparatury na miónoch z kozmického žiarenia za výraznej účasti bratislavskej skupiny (niekoľkomesačné pobyty každý rok). Na tejto tematike bolo vypracovaných niekoľko diplomových prác, napríklad: Erik Saler: „TPC na meranie stôp pri vysokých tokoch častíc“ (1998), Mária Martišíková: „Časovo-projekčná komora na zobrazovanie stôp častíc a ich identifikáciu v prostredí experimentu ALICE“ (2002).

a inštalácii kremíkového pixelového detektora. Vyvinutý riadiaci a kontrolný softvér pre pixelový detektor experimentu ALICE bol použitý na testy a charakterizáciu detekčných modulov a našiel uplatnenie aj mimo ALICE (NA48, NA60, LHCb, AXE). Tento softvér bol neskôr modifikovaný a implementovaný v prostredí SCADA systému PVSS. Skupina sa podieľala na vývoji špecializovaných programových modulov (FED severov), ktoré slúžia ako štandardné rozhranie medzi systémom PVSS a „front-end“ elektronikou detektorov v ALICE. Navrhli štruktúru konfiguračnej databázy detektora a participovali na implementácii mechanizmu pre prenos dát medzi detektorom a databázou. Participovali na definícii a implementácii kontrolných subsystémov pre pixelový detektor: monitorovania a kontroly nízko a vysokonapäťových zdrojov, „front-end“ elektroniky, systému



Obr. 6.9 Testovanie IROC detektorov v laboratóriu na FMFI UK v Bratislave



Obr. 6.10 Inštalácia IROC komôr do TPC ALICE v CERN-e. V popredí M. Šiška

Vývoj a testovanie pixelového detektora ALICE

Ďalšia časť bratislavskej skupiny v zložení Peter Chochula (vedúci skupiny, v súčasnosti trvalý zamestnanec CERN-u, zástupca koordinátora pre kontrolný systém ALICE), doktorandi Peter Rosinský a Svetozár Kapusta sa podieľala na vývoji, testoch

pre ochranu detektora (safety interlock) a rozhrania pre prenos dát medzi systémom zberu dát (DAQ) a kontrolným systémom pixelového detektora.

Skupina vypracovala model pre architektúru kontrolného systému, ktorý pokrýva distribúciu

a integráciu kontrolných systémov jednotlivých detektorov medzi počítače kontrolnej farmy, model pre separáciu kontrolných procesov a užívateľského rozhrania, zálohovanie a ochranu meraných údajov, komunikáciu s externými systémami. Vyvinutý model je v CERN-e odporúčaný ako štandard aj pre ostatné experimenty. V súčasnosti P. Chochula a P. Rosinský pracujú v CERN-e ako členovia koordinačnej skupiny, ktorá zabezpečuje chod experimentu a stanovuje štandardy pre prevádzku detektorov.

Skupina bola a je zodpovedná za databázy kontrolného systému založenom na paralelných databázových severoch ORACLE. Tento systém je schopný ukladať až 150 000 údajov za sekundu. Podieľali sa na definícii počítačovej siete pre kontrolný systém ALICE. V súčasnosti je na túto sieť pripojených viac než 1 200 zariadení.

Členovia skupiny ALICE Bratislava sa od roku 2009 zúčastňujú na zabezpečovaní prevádzky experimentu ALICE, na službách v kontrolnej miestnosti experimentu na pozíciách operátora kontrolného systému detektora a neskôr aj vedúceho služby. Členovia skupiny sa tiež pravidelne zúčastňujú na týždenných odborných stretnutiach fyzikálnych pracovných skupín (PWG2) a na stretnutiach kolaborácie ALICE. Bratislavská skupina si plní povinnosti vyplývajúce z pravidiel práce kolaborácie ALICE. Skupina dosahuje dobré výsledky pri spracovaní experimentálnych dát. Skupina je platným členom kolaborácie ALICE v CERN-e.

Štúdium prenosu baryónového čísla v protón-protónových zrážkach

Od roku 1995 je v Bratislave riešená výskumná úloha „Štúdium exotických foriem hmoty vo vysokoenergetických zrážkach ťažkých iónov“. Skupina ALICE Bratislava sa od spustenia LHC (2008) zaoberá štúdiom prenosu baryónového čísla v protón-protónových zrážkach pri energiách $\sqrt{s} = 0, 9, 7$ a 8 TeV. Michal Broz na tejto téme obhájil dizertačnú prácu v roku 2012. Experimentálne sa táto téma skúma pozorovaním baryón-antibaryónovej asymetrie alebo antibaryón-baryónového pomeru v oblasti centrálnej rapidity. Tento výskum môže spresniť charakter nositeľa baryónového čísla ako aj získať poznatky o štruktúre samotného baryónu. Zaoberali sme sa určením baryón-antibaryónovej asymetrie v centrálnej oblasti rapidity pri rôznych energiách zrážok protónov na LHC, určením závislosti tejto asymetrie od priečnej hybnosti, rapidity a od multiplicity nabitých častíc. Experimentálne výsledky sa porovnávali s teoretickými modelmi.

Bola urobená analýza baryónového pomeru pre protóny, baryóny Λ , nabité baryóny Ξ a Ω . Vzhľadom na to, že povaha týchto častíc je značne rozdielna, predstavuje analýza každej z nich samostatnú tému. Protóny ako stabilné častice sú rekonštruované ako dráhy v TPC ALICE a identifikované pomocou merania korelácie ionizačných strát v plyne a hybnosti. V kontraste s tým, sú častice Λ , Ξ a Ω nestabilné a rozpadajú sa s V^0 , respektíve kaskádnu topológiou rozpadu. Sú rekonštruované na základe ich topológie, pričom sa používajú nabité rozpadové kanály. Identifikácia sa vykonáva s použitím invariantnej hmotnosti používajúc správnu hmotnostnú hypotézu.

Dôležitou časťou analýzy boli korekcie na systematické efekty ktoré ovplyvňujú namerané počtynosti. Pri meraní antibaryón-baryónového pomeru bolo možné, vzhľadom na symetriu experimentu, veľa efektov zanedbať. Avšak pre rozdielnosť interakčných účinných prierezov pre baryón-jadro a antibaryón-jadro bolo nutné zohľadniť niektoré efekty, napríklad absorpciu alebo kontamináciu sekundárnymi časticami. Boli získané korekčné funkcie s použitím Monte Carlo simulácií a dát.

Analýzou protón-protónových zrážok pri troch energiách protibežných zväzkov $\sqrt{s} = 0,9$ TeV, $\sqrt{s} = 7$ TeV a $\sqrt{s} = 8$ TeV boli získané originálne výsledky. Pomery p/p , Λ/Λ , Ξ^+/Ξ^- a Ω^+/Ω^- boli prezentované ako funkcia rapidity, priečnej hybnosti a multiplicity nabitých častíc v interakcii. Výsledky boli porovnané s predpoveďami viacerých teoretických modelov. Ďalej bola spracovaná závislosť pomeru v centrálnej oblasti rapidity od energie zrážky a podivnosti skúmaných baryónov. Bola navrhnutá nová parametrizácia, ktorá dokáže lepšie popísať vývoj pomeru antibaryón-baryón v závislosti od energie zrážky a čiastočne tiež opísať závislosť na podivnosti. Uvedené výsledky boli prezentované M. Brozom na medzinárodnej konferencii „Quark Matter 2012“ vo Washingtone.

Štúdium prenosu baryónového čísla v zrážkach olovo-olovo

Skupina ALICE BA spracovala a analyzovala veľké množstvo dát zo zrážok iónov olova pri energii $\sqrt{s_{NN}} = 2,76$ TeV na zrážku dvoch nukleónov, ktoré boli namerané v rokoch 2010, 2011 a začiatkom roka 2012. Touto témou sa zaoberá od roku 2010 hlavne doktorand Michal Mereš. Pre analýzu bol vytvorený a vyladený programový kód, ktorý slúži na spracovanie dát s využitím distribuovaného počítania na WLCG. Člen skupiny Michal Mereš ako správca klastra WLCG na FMFI UK Bratislava sa zúčastňoval pravidelných stretnutí v CERN-e.

Od začiatku práce WLCG centra v Bratislave bolo spočítaných 1,5 milióna výpočtových úloh.

Z analýzy zrážok iónov olova pri energii $\sqrt{s_{NN}} = 2,76$ TeV bol určený antiprotón-protónový (p/p) pomer v oblasti strednej rapidity a vzhľadom na priečnu hybnosť. Ďalej boli vypočítané a aplikované korekcie pre tento pomer tak, aby sa odstránili nežiaduce faktory, ktoré pôsobia na meranie. Niektoré ďalšie nepresnosti boli zahrnuté do systematickej chyby pre antiprotón-protónový pomer. Kvôli potvrdeniu teoreticky predpovedanej prítomnosti strunového uzla (string junction) bolo urobené porovnanie pomeru antiprotón-protón ako funkcie intervalu rapidity s inými experimentmi. Pre tento krok bolo potrebné spracovať množstvo údajov z oblasti experimentálnej fyziky, aby sme dostali čo najviac informácií o predchádzajúcich meraniach.

Generovanie predpovedí pre pomer p/p bolo realizované pomocou Monte Carlo generátorov HIJING/B a DPMjet. Tieto generátory sú síce štandardne implementované v analyzačnom programovom prostredí experimentu ALICE, ale pre naše potreby boli nutné dodatočné zmeny v ich samotnom kóde. Z teoretického hľadiska bolo veľmi dôležité nameranie a korigovanie pomeru vzhľadom na centralitu zrážky jadier a tiež určenie systematickej chyby. Všetky spomínané výsledky boli osobne alebo prostredníctvom videokonferencie prezentované a konzultované na pravidelných týždenných zasadnutiach v CERN-e. V roku 2013 prebieha meranie antibaryón-baryónového pomeru pre hyperóny v zrážkach iónov olova pri energii $\sqrt{s_{NN}} = 2,76$ TeV. Bolo vytvorených a modifikovaných 20 kódov pre programové balíky AliRoot a pre naše výpočty.

Účasť bratislavskej skupiny na modernizácii ALICE

V roku 2012 bratislavská skupina začala prípravu na zapojenie do inovácie detektora TPC ALICE. Postavili sme dve zariadenia na meranie mobility iónov a previedli sme prvé merania. Úlohou bratislavskej skupiny bude nájsť optimálne zloženie plynovej náplne TPC obsahujúcej rýchly plyn CF_4 tak, aby sa rýchlosť zberu elektrónov a tým aj rýchlosť práce TPC zvýšila trikrát.

Košická skupina na experimente ALICE

Príprava na vstup do experimentu ALICE

Účasť pracovníkov Košických pracovísk – Ústavu experimentálnej fyziky SAV a Prírodovedeckej fakulty Univerzity P. J. Šafárika – na experimente ALICE bola logickým pokračovaním štúdia zrážok relativistických ťažkých iónov a hľadania

prejavov kvarkovo-gluónovej plazmy (QGP) v experimentoch na urýchľovači SPS v CERN-e počas poslednej dekády 20. storočia. Formálny záujem vyjadrili pracoviská spoluautorstvom dokumentu *Letter of Intent for A Large Ion Collider Experiment*, vydanom v roku 1993. K sformovaniu výskumného kolektívu schopného zviditeľniť sa vo veľkej medzinárodnej kolaborácii výraznou mierou prispel Karel Šafařík pôsobiaci v CERN-e. Vedúcou osobnosťou košickej skupiny sa stal Ladislav Šándor z ÚEF SAV, ktorý v nasledujúcich rokoch vykonával manažment finančných a ľudských zdrojov, zabezpečoval kontakty s vedením kolaborácie ALICE a organizoval prácu na projekte. Košickú skupinu ALICE viedol do konca roku 2012. V súčasnosti skupinu vedie Ivan Králik. V košickej skupine ALICE v roku 2012 pracovali M. Bombara, A. Kravčáková a J. Vrláková z Katedry jadrovej fyziky Prírodovedeckej fakulty UPJŠ a P. Kaliňák, I. Králik, M. Krivda, I. Kul'ková, J. Mušínský, L. Šándor, M. Straka, J. Špalek a M. Vaľa z Ústavu experimentálnej fyziky SAV.

Viacere nové technológie plánované pre ALICE na LHC sa v praxi skúmali a overovali na experimentoch s ťažkými iónmi na SPS v CERN-e – kremíkové pixelové detektory, prototyp rozhodovacieho systému (trigger) a systému zberu dát (DAQ). Počas prípravy série dokumentov *Technical design reports* a projektovania ALICE pomohli k optimalizácii niektorých kritických uzlov výpočty radiačnej záťaže pri rôznych scenároch prevádzkových aj havarijných situácií, ktorým sa venoval Blahoslav Pastirčák a Janka Vrláková.

Vývoj, výroba a testovanie smerovača pre SPD

Koncom deväťdesiatych rokov 20. storočia sa bolo treba seriózne rozhodnúť, aký bude príspevok Košickej skupiny do budovania experimentu ALICE. Elektronické moduly navrhnuté a postavené v Košiciach pre experimenty realizované na urýchľovači SPS boli v CERN-e hodnotené ako kvalitné a možnosť postaviť komplexnejší elektronický systém sa javila ako prirodzená voľba. Po viacerých rokoch, s výrazným príspevom K. Šafaříka, došlo k dohode s F. Antinorim, vedúcim projektu kremíkového pixelového detektora (SPD), o možnostirobiť elektroniku smerovača (router) pre tento detektor. Návrh logickej schémy, vypracovaný Jaroslavom Bánom, bol prijatý kladne, ale vznikali otázky, či košická skupina je schopná navrhnuté zariadenie aj vyvinúť a zrealizovať. Na posúdenie týchto otázok boli koncom novembra 1999 pozvaní zástupcovia všetkých relevantných podsystémov (F. Antinori, E. Quercigh, O. Villalobos Baillie, P. Chochula, F. Formenti, M. Burns, A. Palmeri)

do Košíc na poradu, kde boli v priebehu 3 dní rozptýlené všetky pochybnosti a bolo rozhodnuté, že elektronika pre SPD bude hlavným hardvérovým príspevkom košickej skupiny. Krátko po tomto rozhodnutí, ideový autor projektu J. Bán získal dlhodobý kontrakt v USA a v ďalšom vývoji a samotnej realizácii smerovača pokračoval v tom čase začínajúci inžinier Marián Krivda, ktorý nakoniec celý projekt doviedol do úspešného konca.



Obr. 6.11 Jeden VME modul (veľkosti 9U) smerovača pre kremíkový pixelový detektor

SPD poskytuje dáta z asi 10 miliónov kanálov, pričom musí vedieť komunikovať s tromi centrálnymi systémami – centrálnym rozhodovacím procesorom (CTP), systémom zberu dát (DAQ) a systémom riadenia detektora ALICE (DCS), a zároveň musí byť mať možnosť konfigurácie, kalibrácie a monitoringu svojich pracovných parametrov. Správne smerovanie všetkých dát a signálov medzi spomínanými systémami a SPD vykonáva smerovač, pozostávajúci z dvadsiatich modulov štandardu 9U VME, s rozmermi 34 cm×36 cm. Všetky funkcie modulov sú realizované pomocou programovateľných hradlových polí. Desaťvrstvové plošné spoje boli vyrobené a osadené vo Francúzsku. (obr. 6.11). Testovania, merania, opravy a prevádzkovú údržbu smerovača počas zberu dát vykonávali Marián Krivda a Jozef Špalek.

Okrem toho M. Krivda pre pixelový detektor vyvinul a zrealizoval JTAG kontrolér slúžiaci na konfigurovanie jednotlivých pixelových čipov SPD. JTAG kontrolér je integrovanou súčasťou smerovača, okrem toho bolo zhotovených 25 samostatných modulov JTAG kontroléra (obr. 6.12) využitých ako súčasť testovacích systémov častí SPD, budovaných na viacerých, prevažne talianskych, pracoviskách. Aby mohol byť SPD použitý ako detektor zapojený do systému rozhodovania (CTP), M. Krivda vyvinul elektroniku na rýchle spracovanie dát z SPD a generovanie rýchlych signálov pre CTP.

Vývoj a výroba centrálného rozhodovacieho procesora

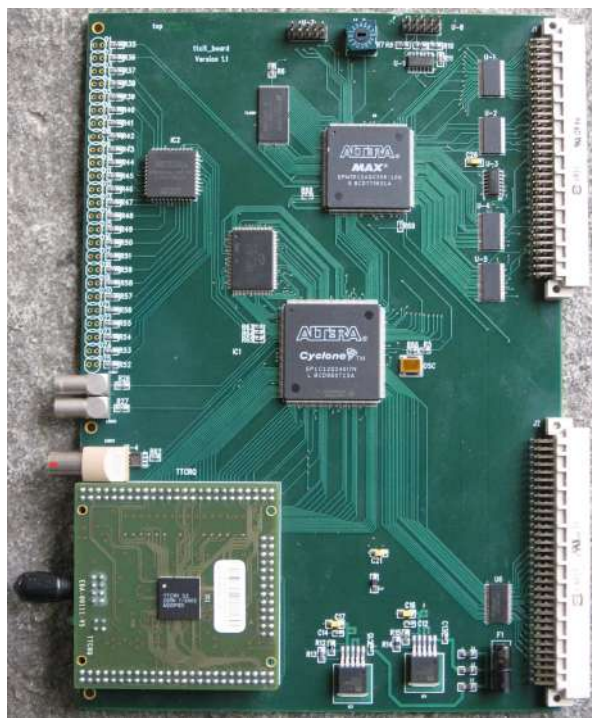
Od roku 2001 sa datuje spolupráca s Univerzitou v Birminghame (Veľká Británia) pri budovaní a prevádzkovaní centrálného rozhodovacieho procesora (CTP). Úlohou tohto systému je rýchle vyhodnotenie signálov z vybraných detektorov a rozhodnutie o detekcii fyzikálne zaujímavého prípadu v detektoroch ALICE. Táto funkcia je potrebná na obmedzenie množstva zapisovaných a spracovávaných dát, a filtrovanie zaujímavých málo pravdepodobných prípadov na urýchlenie fyzikálnej analýzy.

Samotný rozhodovací procesor (CTP) bol navrhnutý a postavený britskou skupinou z univerzity v Birminghame, tvorbou programového vybavenia bol poverený Anton Jusko, ktorý bol v roku 2003 pozvaný na dlhodobý pracovný pobyt do Birminghamu. Ten sa potom v priebehu nasledujúcich 10 rokov venoval vývoju, zdokonaľovaniu a prevádzkovaniu softvéru pre CTP počas budovania ALICE a tiež aj počas zberu dát z LHC. Po tom, ako odišiel autor hardvéru CTP P. Jovanovič do dôchodku, prevzal M. Krivda prevádzkovanie a ďalší vývoj elektroniky CTP.

Na monitorovanie a ladenie prenosu signálov z CTP k jednotlivým detektorom vyvinul M. Krivda modul s označením TTCit (obr. 6.13). Riadiaci a analyzáčny softvér k nemu napísal Ivan Králik. Úlohou TTCit je zachytávať všetky správy a signály posielané vybranému detektoru, analýza ich časovej štruktúry a odhaľovanie možných problémov v komunikácii (chýbajúce signály, nesprávne časovanie a pod.). Monitorovanie chodu CTP si vyžaduje sledovanie asi 1500 premenných, ako sú napr. počítadlá signálov, počítadlá časových impulzov, úrovne elektrických napätí, teploty modulov a pod. Aplikáciu v špecializovanom systéme PVSS, vykonávajúcu samotný monitoring a vizualizáciu výsledkov, napísal Jozef Urbán.



Obr. 6.12 JTAG kontrolér slúžiaci na konfigurovanie jednotlivých pixelových čipov SPD



Obr. 6.13 Elektronický modul TTCit používaný na ladenie prenosu signálov z rozhodovacieho procesora k detektorom

Celkovú hodnotu príspevku košickej skupiny do budovania experimentu ALICE, ak nepočítame prevádzkové náklady a náklady na pobyt pracovníkov v CERN-e, možno oceniť na 400 000 CHF.

Systém na monitorovanie svietivosti LHC pre ALICE v reálnom čase

Na jar 2008, v očakávaní prvých zväzkov v LHC, vznikla v skupine zodpovednej za CTP požiadavka na program monitorovania štruktúry a intenzity zväzkov LHC, spracovávajúci dáta z rozhodovacieho procesora. Prvá verzia bola pripravená k fyzikálnemu spusteniu LHC na jeseň 2009. V roku 2010 na základe požiadaviek prevádzkovateľov urýchľovača na základe existujúceho kódu vznikol komplexný systém na monitorovanie svietivosti LHC poskytovanej experimentu ALICE v reálnom čase, ktorý sa stal integrálnou súčasťou systému riadenia detektora (DCS) a začal poskytovať dáta pre kontrolu kvality zväzkov LHC. Od roku 2011 až do februára 2013 monitorovací systém spoľahlivo pracoval v nepretržitej prevádzke. Autorom projektu je I. Králik. Tento monitorovací systém slúži aj ako zdroj dát počas špecializovaných Van der Meerovských skanov využívaných experimentmi na meranie normalizačných účinných priereзов. Od novembra 2012 sa I. Králik aktívne podieľa na analýze týchto dát.

Fyzikálna analýza

Nosnou témou fyzikálnej analýzy, prebiehajúcej v Košiciach, je štúdium produkcie podivných častíc

v zrážkach p-p a Pb-Pb pri energiách dostupných na LHC. Ladislav Šándor, Peter Kaliňák a Marián Putiš sa zamerali na štúdium produkcie neutrálnych kaónov a Λ hyperónov, Martin Val'a a Ján Mušínský sa sústredili na skúmanie produkcie ϕ -mezónov. Doktoranti P. Kaliňák a M. Putiš na uvedenej tematike úspešne obhájili v roku 2012 svoje dizertačné práce. Hlavným výsledkom práce M. Putiša a P. Kaliňáka bolo pozorovanie zvýšenia relatívnej produkcie hyperónov Λ voči K mezónom v oblasti stredne veľkých priečných zložiek hybností (medzi 2 až 6 GeV/c) v zrážkach Pb-Pb pri energii 2,76 TeV a p-p pri energii 7 TeV. Výsledky sú v dobrej zhode s teoretickými modelmi uvažujúcich súhrn dvoch mechanizmov: termálnu produkciu v rovnovážnom stave a tvrdé zrážky partónov. M. Putiš prezentoval za kolaboráciu ALICE svoje výsledky formou posteru v máji 2011 na konferencii Quark Matter v Annecy vo Francúzsku. P. Kaliňák s podobnou tematikou vystúpil v septembri 2011 na medzinárodnej konferencii Strangeness in Quark Matter v Krakove v Poľsku.

V roku 2009 sa do Košíc vrátil z Birminghamu Marek Bombara, ktorý začal analyzovať uhlové korelácie medzi podivnými časticami s veľkými priečnymi zložkami hybnosti a nepodivnými časticami v centrálnych zrážkach Pb-Pb. I. Králik sa koncom roku 2012 začal venovať meraniu účinných priereзов používaných k normalizácii fyzikálnych výsledkov.

Pre zefektívnenie fyzikálnej analýzy Martin Val'a vybudoval výpočtový klastor SKAF (Slovak Kosice Analysis Facility) poskytujúci nástroje na paralelné spracovanie veľkého objemu dát. Technické riešenia realizované v SKAF boli použité v obdobných počítačových klastroch v CERN-e a ďalších centrách v Európe. M. Val'a prednášal ako lektor na medzinárodných školách GridKa School v Karlsruhe v Nemecku v rokoch 2011 a 2012.

V roku 2012 získala štatút asociovaného člena ALICE skupina Jána Jadlovského z Fakulty elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach. Aktívne sa zapojila do prác na rozvoji a modernizácii kontrolného systému (DCS) detektora ALICE.

Účasť košickej skupiny na modernizácii ALICE

V rokoch 2013 a 2014 bude prebiehať príprava urýchľovača a jednotlivých detektorov na zber dát pri vyššej energii. M. Krivda a J. Špalek prispievajú ku konštrukcii elektroniky pre centrálny rozhodovací procesor, ktorá zvýši flexibilitu výberu prípadov s fyzikálne zaujímavými signatúrami. To si vyžiada aj prepísanie kódu systému na monitorovanie svietivosti zväzku, ktorý bude rozšírený o ďalšie funkcie.

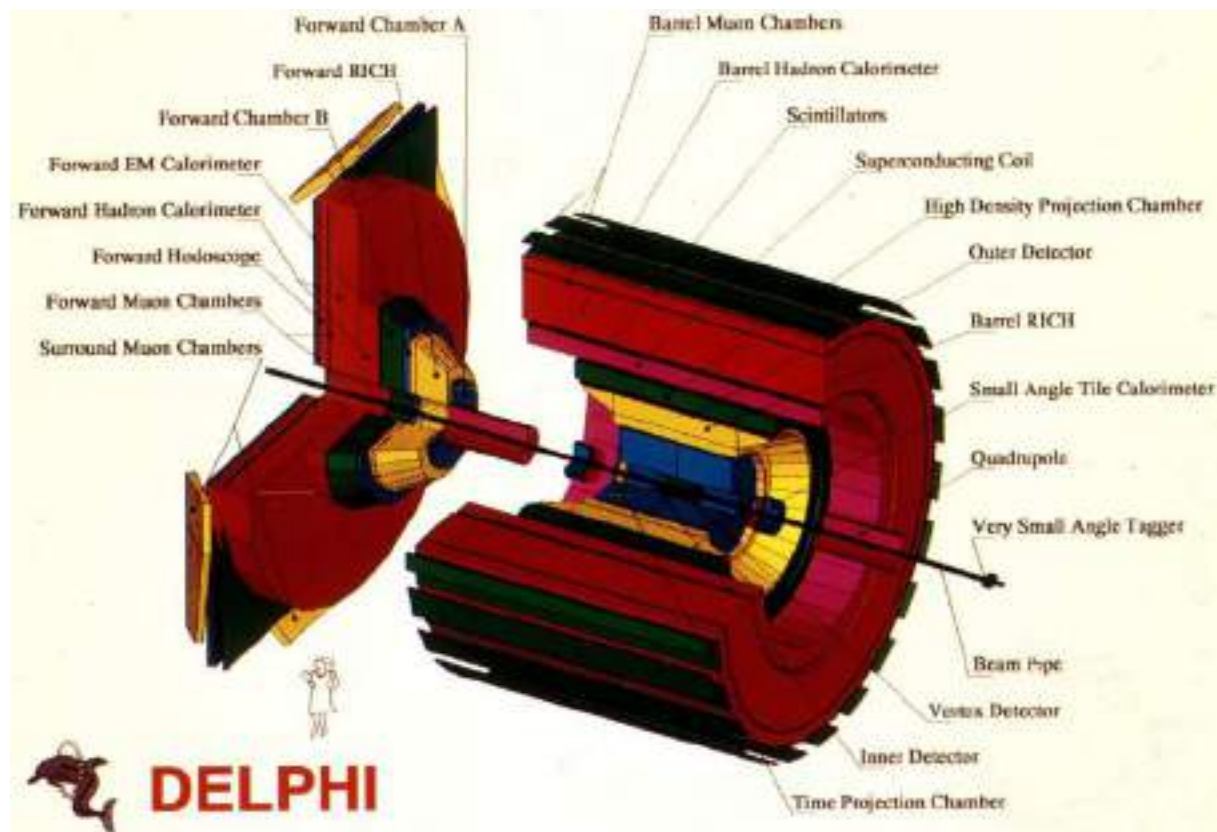
V dlhodobejšom horizonte sa košická skupina zapojila do projektovania nového centrálneho dráhového detektora ITS, ktorý by mal nahradiť existujúcu aparatúru a zaistiť nielen zvýšenie presnosti merania pri zvýšenej hustote nabitých častíc, ale aj podstatné zvýšenie rýchlosti čítania dát. V sú-

časnosti prebieha testovanie pasívnych a aktívnych elektronických komponent s ktorými sa počíta pri konštrukcii nového CTP. V pláne je aj modernizácia elektronického a detektorového laboratória na Ústave experimentálnej fyziky pre účely testovania nových pixelových čipov.

7 Experiment DELPHI na LEP

Experiment DELPHI (Detector with Lepton, Photon and Hadron Identification) bol jedným zo štyroch experimentov inštalovaných na elektrón-pozitrónovom zrážaci LEP v CERN-e. Prevádzka DELPHI bola zahájená v roku 1989 a ukončená po demontovaní urýchľovača LEP v roku 2000. Analýza dát však oficiálne pokračovala ďalších 10 rokov. Kolaborácia DELPHI sa skladala z 550 fyzikov z 56 univerzít a výskumných ústavov z 22 krajín.

Detektor DELPHI skonštruovaný z inovatívnych detekčných modulov sa využíval na štúdium elektrón-pozitrónových zrážok pri maximálnych energiách až do 209 GeV. Na obrázku 7.1 je znázornený schematický náčrt experimentu s jeho jednotlivými komponentmi, špecializovanými na identifikáciu dráh, typu a energie častíc. Valec s priemerom 10 m a vážiaci 3500 ton obklopoval interakčný bod zrážaca LEP. Väčšina detektorov bola inštalovaná vo vnútri supravodivého magnetu poskytujúceho pole s magnetickou indukciou 1,23 Tesla.



Obr. 7.1 Schematický náčrt experimentu DELPHI

V porovnaní s ostatnými, relatívne konzervatívnymi experimentmi na LEP, DELPHI využíval revolučné technológie vo viacerých oblastiach. Solenoid experimentu bol napríklad v čase prevádzky najväčším skonštruovaným supravodivým magnetom. Kontrolný systém využíval nový koncept modulov s autonómnym operačným systémom. Pixelové detektory v experimentoch s protiběžnými zväzkami

boli prvýkrát použité na DELPHI. Plynové detektory, časovo projekčná komora – TPC, polovodičový dráhový detektor či Čerenkovský detektor RICH predstavovali technologické unikáty, ktoré boli silnou inšpiráciou pre moderné systémy neskôr vyvinuté a nasadené v experimentoch LHC. Obrázok 7.2 ilustruje prednú časť experimentu, takzvaný „End-cap“ s dobre viditeľnými komorami FCA,

ktoré navrhla a skonštruovala skupina z HEPHY Viedeň. Na ich prevádzke sa podieľala aj bratislavská skupina.

Najdôležitejšie fyzikálne výsledky na DELPHI

Jeden z hlavných cieľov experimentu DELPHI spolu s ostatnými experimentmi na LEP bolo študovanie aspektov Štandardného modelu. Štúdium sa zameralo hlavne na meranie účinných prierezov rozpadov Z bozónu na hadróny. Z nameranej šírky



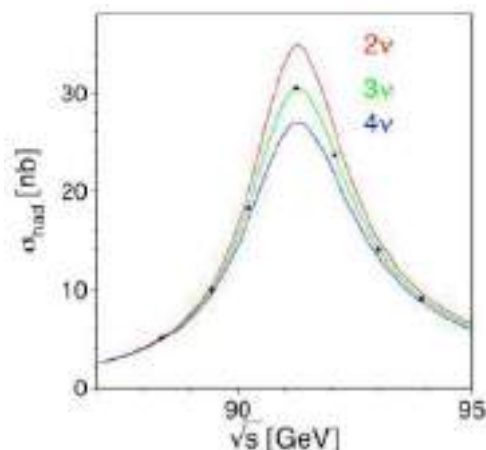
Obr. 7.2 Modul experimentu DELPHI (Foto CERN)

Z bozónu experiment DELPHI určil počet generácií neutrín, čo ukazuje graf 7.3. Pravdepodobný počet neutrín bol stanovený na 3. Ďalšie experimenty potvrdili tento významný objav, že počet generácií leptónov aj kvarkov je práve tri, čo je jedným z hlavných atribútov Štandardného modelu.

Spolupráca FMFI UK s experimentom DELPHI

Počiatky spolupráce s FMFI UK s DELPHI majú korene v spoločnom Slovensko-Rakúskom projekte East-West Cooperation Project. FMFI nadviazala v roku 1990 pod vedením Pavla Povinca tesnú spoluprácu s Ústavom fyziky vysokých energií (HEPHY) vo Viedni. Jadro skupiny tvorili Peter Kubinec, Ivan Mikulec, Peter Chochula so svojimi študentmi Jurajom Bracínikom a Petrom Rosinským. V počiatočnom štádiu sa bratislavská skupina zameriavala na technické projekty, naviazané na aktivity HEPHY v rámci experimentu DELPHI. Medzi riešené úlohy patrilo programové vybavenie pre vyhľadávanie sekundárnych vertexov v experimente (P. Kubinec), testy čítacej elektroniky založenej na systéme FASTBUS a vývoj prislúchajúceho online a offline programového vybavenia (I. Mikulec), vývoj algoritmov pre vyhľadávanie dráh častíc v plynových dráhových detektoroch FCA (P. Chochula).

Fyzikálny program skupiny sa profiloval na vyhľadávanie vzácnych prípadov v e^+e^- zrážkach (P. Kubinec so študentmi) a polarizácie τ leptónu (I. Mikulec). Ako príklad uvedieme hľadanie Λ_b^0 baryónov vo farebne povolených kanáloch $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+ \pi^- / a_1^-$ s nasledovnými rozpadmi $\Lambda_c^+ \rightarrow p K^- \pi^+$, $p K_s^0$, $\Lambda^0 \pi^0$ a $a_1^- \rightarrow \rho^0 \pi^-$, $\pi^+ \pi^-$. O komplexnosti riešeného problému svedčí fakt, že pre nájdenie štyroch prípadov zodpovedajúcich študovaným rozpadom bolo potrebné zanalyzovať takmer tridsaťpäť miliónov zrekonštruovaných e^+e^- zrážok.



Obr. 7.3 Meranie šírky Z bozónu na experimente DELPHI potvrdilo hypotézu o existencii práve troch generácií neutrín

Skupina sa v rámci spolupráce s HEPHY Viedeň, INFN Rím, IJS Ľubl'ana, FÚ ČAV a MFF KU Praha, zapojila do vývoja a testov nových kremíkových detekčných modulov pre DELPHI. Vďaka medzinárodnej spolupráci a pomoci HEPHY Viedeň bolo bratislavské pracovisko vybavené špičkovou výpočtovou a laboratórnou technikou a mohlo sa samostatne podieľať na riešení úloh.

Po nadviazaní spolupráce s Ústavom fyziky a biofyziky UK v roku 1993 sa skupina rozšírila o Branislava Sitára a Rudolfa Janika. S technickou pomocou Jozefa Haška a Miroslava Šulca bolo v Bratislave vybudované pracovisko na vývoj a testy polovodičových detektorov. V roku 1995 bola Bratislavská skupina akceptovaná za člena kolaborácie DELPHI.

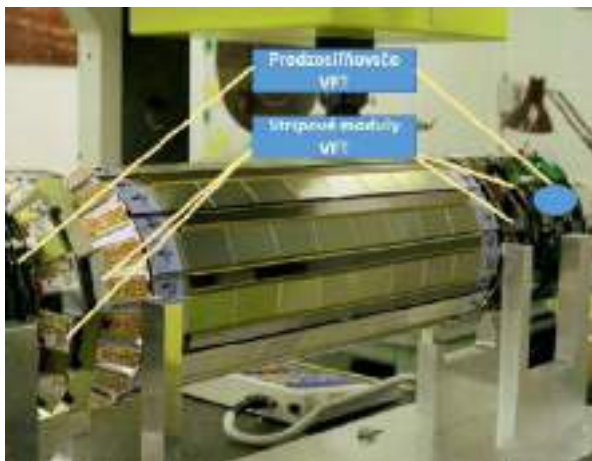
Bratislavská skupina sa podieľala aj na prevádzke experimentu DELPHI. Vďaka silnej technickej aj materiálnej podpore HEPHY Viedeň sme prevzali časť zodpovednosti za chod predných dráhových detektorov experimentu FCA, testy elektroniky pre spúšťačiaci systém (trigger), koordináciu kontrolného systému (I. Mikulec) a koordináciu prevádzky polovodičového vrcholového detektora (P. Chochula).

Vývoj, testy a využitie polovodičových detektorov na DELPHI

Vďaka profilácii bratislavského laboratória na polovodičové detektory riešila skupina viacero úloh. Nosnou aktivitou bol vývoj detektorov na modernizáciu centrálneho dráhového systému v DELPHI (P. Chochula, R. Janik, I. Mikulec, P. Rosinský). Aktívne sa podieľali na vývoji a testoch detektorov pre nový detektor Very Forward Tracker (VFT). Po ustálení architektúry prebrala bratislavská skupina zodpovednosť za výrobu finálnych mikrostriповých modulov. Táto delikátna operácia vyžadovala spojenie polovodičových senzorov a hybridnej odčítavacej elektroniky s presnosťou 20 μm . Otestované jednostranné moduly sa potom spájali do objstranného detektora tak, že sa dva senzory spojili zlepením. Po upevnení mechaniky boli detektory testované a inštalované v DELPHI.

Montáž detektorov predstavovala logistickú aj technickú výzvu. Sensory vyrobené vo Veľkej Británii boli testované v Ríme a vo Viedni. Hybridná elektronika pochádzala z Ljubljany, mechanika z Prahy. Časti modulov sa stretli v Bratislave, kde boli skompletované odoslané na testy na jednotlivých pracoviskách, aby sa opäť vrátili na finalizáciu na FMFI UK Bratislava.

Vďaka nadobudnutým skúsenostiam sa laboratórium zapojilo do viacerých súvisiacich projektov. Skupina skompletovala a otestovala predzosilňovače pre kremíkový detektor DELPHI, vyvinula online softvér pre zber dát a programové moduly pre offline analýzu. Na obrázku 7.4 je ukázaný vrcholový polovodičový detektor s modulmi a predzosilňovacími kartami skonštruovanými v Bratislave.



Obr. 7.4 Kremíkový detektor experimentu DELPHI. Na obrázku sú ukázané kremíkové moduly VFT a karty predzosilňovačov vyrobené v Bratislave. (Foto CERN)

Skúsenosti s dlhodobou prevádzkou detektorov v CERN-e odhalili fakt, že moduly sú citlivé na zmenu atmosférickej vlhkosti. Dôkladné štúdium

tohto javu vyžadovalo relatívne náročné laboratórne vybavenie zahŕňajúce citlivé meracie prístroje, elektronicky riadené polohovacie zariadenie a mikrosondy na kontaktovanie detektora. V Bratislave skupina skonštruovala klimatizovanú komoru, v ktorej bolo možné simulovať extrémne podmienky. Systematickým štúdiom veľkého súboru detektorov sme získali výsledky o viazaní vlhkosti v pasívačnom oxide detektorov ako aj o mechanizmoch poškodenia elektronických obvodov a infraštruktúry detektora (P. Rosinský, P. Chochula, R. Janik). Nové poznatky boli aplikované pri vývoji detektorov aj pre ďalšie generácie experimentov v CERN-e.

Radiačné poškodenie detektorov na DELPHI nepredstavovalo vážnejší problém. Skúsenosti získané s ich prevádzkou však umožňovalo našim expertom zapojenie do výskumných projektov zameraných aj na túto problematiku. Testovacie zariadenia na štúdium správania sa detektorov pre potreby LHC vychádzali z dizajnu DELPHI alebo boli od neho odvodené. Bratislavské pracovisko sa zapojilo do výskumu radiačných efektov v polovodičových senzoch v rámci spolupráce RD20 (P. Chochula, I. Mikulec, P. Povinec). V spolupráci s TESLA Rožnov sme aplikovali metodiku na priamy výpočet koncentrácie dopantov v ožiarených moduloch.

V roku 1997 kolaborácia RD38 experimentálne overila hypotézu a možnosti znovuoživenia radiačne poškodených modulov. Po ochladení na dusíkové teploty dochádza k senzoch k procesu, ktorý bol nazvaný „Lazárov jav“. Vďaka tomuto javu sa poruchy v senzore saturujú elektrónmi a deaktivujú sa. Pokiaľ je silne ožiarený detektor udržiavaný v kryogénnych podmienkach, môže bezchybne fungovať, aj keď pri izbovej teplote by jeho radiačné poškodenie bolo považované za nezvratné. Bratislavská skupina (P. Chochula, P. Rosinský) participovala na tomto experimente. Moduly pôvodne určené pre DELPHI boli radiačne poškodené tak, že elektronický šum neumožňoval detekciu častíc. V kryogénnych podmienkach sa ich funkčnosť plne obnovila.

Skúsenosti získané z DELPHI, zo spolupráce na RD20, s kryogénnymi experimentami ako aj vývojom programového vybavenia pre pixelové detektory experimentu ALICE skupine umožnili zapojiť sa do experimentu NA60. Peter Rosinský a Peter Chochula sa podieľali na vývoji pixelového teleskopu a prevádzke experimentu, ktorá zahŕňala aj kryogénne detekčné systémy.

Spolupráca s NA60 je príkladom syntézy poznatkov a ich prenosu na nové experimenty. Jednou z hlavných misií CERN-u je prenos technológií

a vedomostí medzi spolupracujúcimi inštitútmi. Bratislavské pracovisko získalo vďaka DELPHI bázu na výskum v oblasti fyziky vysokých energií, ale posilnilo si aj vlastné vybavenie. Pre analýzu dát sme s finančným príspevom HEPHY Viedeň zakúpili moderné počítače a veľkokapacitné úložiská dát. Vďaka skúsenostiam získaným v CERN-e skupina dokázala toto výpočtové laboratórium spravovať a využiť aj vo vzdelávacom procese. Na Katedre jadrovej fyziky sa napríklad otvorilo

nové zameranie orientované na počítačovú fyziku, ktoré získalo medzi študentami vysokú popularitu. Už v prvom kurze členovia skupiny vyučovali technológiu WWW, vyvinutú a testovanú v CERN-e.

Prvý experimentálny web-server, spustený už v roku 1991, sa stal základom informačného systému na Katedre jadrovej fyziky MFF a bol (pravdepodobne) prvým WWW serverom inštalovaným na Slovensku.

8 Dileptóny a podivné častice v zrážkach ťažkých iónov na SPS

Relativistická fyzika ťažkých iónov je pomerne mladá, intenzívne sa rozvíjajúca oblasť fyzikálneho výskumu. Jej aktuálnosť a atraktivnosť je založená na predpovedi súčasnej teórie silnej interakcie – kvantovej chromodynamiky (QCD), že pri dostatočne vysokých teplotách a hustotách bežná jadrová hmota môže prejsť fázovým prechodom do stavu, v ktorom sa elementárne fermióny – kvarky a gluóny – voľne pohybujú. Tomuto stavu hovoríme kvarkovo-gluónová plazma (QGP) a všeobecne akceptovaný kozmologický scenár vývoja Vesmíru predpokladá, že celý Vesmír bol niekoľko mikrosekúnd po Veľkom tresku v stave QGP. Jedinou realistickou možnosťou, ako takýto stav študovať v laboratórnych podmienkach, je vytvoriť dostatočne horúce a husté prostredie v zrážke dvoch čo najťažších jadier pri veľmi vysokých energiách. Parametre urýchľovača SPS (Super Proton Synchrotron) v CERN-e viedli k predpokladu, že v zrážkach urýchlených jadier s jadrovým terčikom bude možné pozorovať prejavy QGP. V roku 1986 boli na SPS urýchlené jadrá ^{16}O na energiu 60, neskôr 200 GeV na nukleón, o rok neskôr sa podarilo urýchliť ióny ^{32}S na energiu 200 GeV na nukleón. Urýchľovanie skutočne ťažkých iónov ^{208}Pb na energiu 158 GeV na nukleón začalo na SPS v roku 1994. Procesy zrážok ťažkých iónov sa začali intenzívne študovať v rade experimentov.

Experimentátori z Košíc (Michal Seman, Ladislav Šándor) sa do prvých kontaktov s fyzikou ťažkých iónov v CERN-e dostali v rokoch 1987–8 v rámci individuálnej účasti v experimente NA34 – HELIOS (High Energy Lepton and IOn Spectrometer). Na obrázku 8.1 je pohľad na detektory experimentu HELIOS v severnej experimentálnej hale SPS. V tomto experimente sa študovali základné charakteristiky jadro-jadrových zrážok, ako meranie toku priečnej energie alebo odhad hustoty energie v interakčnej oblasti. Tieto merania demonštrovali, že hustota energie pri zrážke jadier síry, urýchlených na energiu 200 GeV na nukleón, s jadrami volfrámu, dosahuje hodnoty, predpovedané pre oblasť pre-

chodu hadrónovej hmoty do stavu QGP. Individuálna účasť košických fyzikov v experimente HELIOS čoskoro vyústila do prvej oficiálnej účasti československého pracoviska – Ústavu experimentálnej fyziky (ÚEF) SAV v Košiciach – v experimente CERN-u. Išlo o experiment NA34/3, ktorého vedúcim bol Georges London.



Obr. 8.1 Pohľad na detektory experimentu NA34 – HELIOS v severnej experimentálnej hale SPS v CERN-e. Na ľavej strane fotografie je miónový spektrometer, ktorý v modifikovanej verzii bol hlavným detektorom experimentu HELIOS/3

Experiment NA34/3 (HELIOS-3)

Experiment HELIOS-3 realizoval netriviálnu úlohu rozšíriť merania produkcie dileptónov, vykonané v experimente NA34 pre elementárne hadrónové zrážky, do oblasti jadro-jadrových zrážok. Experiment NA34 využíval vysoko sofistikovanú aparaturu (spektrometer elektrónov, spektrometer miónov, kalorimetrické detektory na meranie energie pokrývajúce celý priestorový uhol) na dva ciele: detekciu dileptónov a fotónov v p-Be interakciách pri energii 450 GeV (HELIOS-1) a už spomenuté

štúdium jadro-jadrových zrážok (HELIOS-2). Štúdium dileptónov bolo motivované rozpornou situáciou, kedy viaceré výsledky predošlých experimentov naznačovali, že spektrum dileptónov malých hmotností (pod hmotnosťou mezónu ρ) nemožno opísať štandardnými zdrojmi dileptónov z dalitzovských rozpadov známych mezónov. Vďaka precíznej aparatúre a simultánnemu meraniu dileptónov a dalitzovského rozpadu mezónu η výsledky HELIOS-1 demonštrovali dobrú zhodu nameraného spektra dileptónov so sumárnym príspevkom od štandardných zdrojov. K dobrému opisu údajov teda nebolo potrebné uvažovať žiaden nový neštandardný zdroj produkcie dileptónov. Vznikala ale otázka, aké bude spektrum dileptónov z protón-jadrových a najmä jadro-jadrových zrážok. Lepťóny – v našom prípade mióny – s jadrovým prostredím neinteragujú a tak nesú neskreslenú informáciu o prvej fáze zrážky. V prípade vzniku QGP možno očakávať anomálie v spektre dimiónov v porovnaní so štandardnými zdrojmi z rozpadov hadrónov. Štúdium týchto otázok bolo hlavnou náplňou experimentu HELIOS-3, pretože presnosť merania invariantných hmotností dimiónov v HELIOS-2 nebola pre tento účel vyhovujúca. (Z pôvodnej veľkej kolaborácie HELIOS v roku 1988 vznikli tri kvalitné experimenty – NA34/3, NA44 a NA45).

Na splnenie neľahkej úlohy registrovať dileptóny (dimióny) z p-W a S-W interakcií s dostatočným rozlíšením a eliminovať vysoký príspevok pozadia od rozpadov π a K mezónov, ako aj dimiónov produkovaných v materiáli absorbátora, bol v experimente použitý podstatne modifikovaný a optimalizovaný miónový spektrometer HELIOS. Na obr. 8.1 pôvodný miónový spektrometer vidno na ľavej strane fotografie. Vďaka výsledkom, dosiahnutým v individuálnej účasti v experimente HELIOS, sa košická skupina fyzikov (Jaroslav Antoš, Ivan Králik, Ladislav Šándor, Jozef Urbán) stala oficiálnym účastníkom experimentu HELIOS-3.

Experimentálne údaje o p-W a S-W interakciách boli získané v roku 1990, a dostatočne veľký objem získaných dát umožnil analyzovať nielen oblasť malých, ale aj vyšších (až po hmotnosť častice J/Ψ) invariantných hmotností dimiónov. Košický príspevok k analýze údajov experimentu bol výrazný. Spomeňme tu výsledky predbežnej analýzy oblasti vyšších hmotností, ktorú vykonal a na konferencii *Rencontres de Moriond* v marci 1992 referoval Jaroslav Antoš. V protón-jadrovej zrážke je súhlas hmotnostného spektra dileptónov so sumárnym spektrom známych štandardných zdrojov dobrý, v spektre z jadro-jadrovej zrážky vidno výrazne zvýšenú produkciu dimiónov v oblasti okolo hodnoty $1,6 \text{ GeV}/c^2$. To bola

jedna z prvých indikácií zvýšenej produkcie dileptónov v oblasti pod hmotnosťou J/Ψ v jadro-jadrových zrážkach. Významnú úlohu v metodickú i fyzikálnu analýzu údajov v celej študovanej oblasti hmotností zohral Ivan Králik, ktorý v roku 1991 absolvoval ročný štipendijný pobyt v CERN-e. V rámci účasti v experimente HELIOS-3 absolvoval vedeckú výchovu pod vedením vedúceho experimentu G. Londona a jeho výsledky boli súčasťou finálnej publikácie, ktorá v súvislosti s nutnosťou riešenia viacerých metodických problémov vyšla v časopise *European Physics Journal C* až v roku 2000. Hlavným výsledkom bolo zistenie, že v celom študovanom intervale hmotností dimiónov sa pozoruje v jadro-jadrových zrážkach anomálna (zvýšená) produkcia dimiónov. Nasledujúce experimenty, najmä experimenty CERES (NA45) a NA38, tieto závery potvrdili.

Experimenty WA94, WA97 a NA57

V experimente HELIOS/3 boli získané významné výsledky, ale jediné údaje boli (v súlade s návrhom experimentu) získané na urýchľovači SPS v roku 1990 a napriek určitým úvahám o pokračovaní sa ďalšie ožiarenia nerealizovali. Preto pred košickou skupinou stála otázka, ako v problematike zrážok ťažkých iónov pokračovať. Skupina dostala ponuku zapojiť sa do experimentu NA44, kde pôsobila časť spolupracovníkov z programu HELIOS, veci sa však vyvinuli inak. Karel Šafařík, vtedy pracovník ÚEF SAV, získal na jar 1990 možnosť pôsobiť tri roky v laboratóriu prof. Marcela Froissarta na Collège de France v Paríži a tam sa zapojil do výskumu produkcie podivných častíc v zrážkach zväzku jadier síry s volfrámovým terčíkom (zrážky S-W) v experimente WA85 na spektrometri Omega v CERN-e pod vedením Emanuela Quercigha.

Zvýšená produkcia hyperónov a antihyperónov v jadro-jadrových zrážkach, ako jedna zo signatúr vzniku QGP, bola predpovedaná Johannom Rafelskim a Berndtom Müllerom ešte začiatkom osemdesiatych rokov minulého storočia. Skupina E. Quercigha sa zamerala na systematické štúdium tejto problematiky. WA85 bol prvý zo série štyroch experimentov, orientovaných na podrobné merania produkcie podivných častíc v zrážkach častíc a jadier s jadrami.

Prvé dva experimenty, WA85 a WA94 boli uskutočnené na spektrometri Omega vo zväzku iónov ^{32}S pri energii 200 GeV na nukleón s využitím detektorov z predošlých experimentov. Spektrometer Omega bola viacúčelová aparatura, ktorej základom bol kvalitný supravodivý magnet, vytvá-

rajúci homogénne magnetické pole 1,8 T v objeme dostatočne veľkom na rozmiestnenie rôznych konfigurácií detektorov. Magnet používali striedavo viaceré experimenty, ktoré v magnetu a jeho okolí inštalovali svoje špecifické detektory. Spektrometer Omega je znázornený na obrázku 8.2. V roku

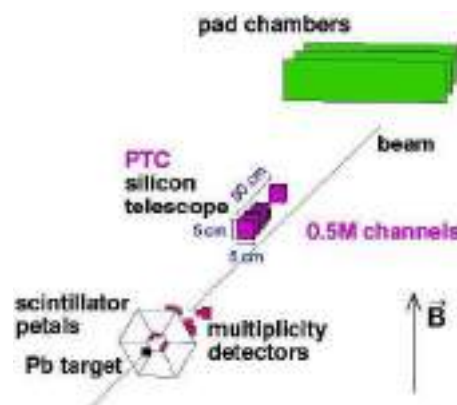


Obr. 8.2 Spektrometer OMEGA v západnej experimentálnej hale SPS. V centre obrázku vidno magnet, v ktorom boli umiestnené detektory experimentov WA94 a WA97

1991 experiment WA85 končil a plánovali sa ďalšie experimenty – WA94 (zrážky S-S) a WA97 (zrážky Pb-Pb). Táto tematika oslovila aj košických fyzikov a prostredníctvom K. Šafaříka sa uskutočnili prvé kontakty s E. Quercighom. V máji 1991 E. Quercigh v sprievode K. Šafaříka navštívil ÚEF SAV a dohodol s vedením ústavu účasť skupiny košických fyzikov v ambicióznom experimente WA97, pre ktorý sa plánovalo vybudovať nové moderné detektory a ktorý mal byť pripravený k ožiareniu vo zväzku iónov ^{208}Pb v roku 1994, po potrebnej modernizácii urýchľovacieho komplexu. E. Quercigh slovenským fyzikom ponúkol aj možnosť účasti na menšom experimente WA94, pokračovaní WA85, pri štúdiu symetrických S-S zrážok. Spolupráca na projekte WA94 bola veľmi užitočná pre získanie potrebných skúseností s metódou spracovania a analýzy údajov zo spektrometra Omega. Bol to začiatok viac ako pätnásťročnej úspešnej spolupráce s CERN-om pri náročnom štúdiu procesov produkcie podivných častíc, v ktorej slovenskí fyzici významne prispeli k realizácii experimentov a k získaniu radu unikátnych výsledkov.

Usporiadanie experimentu WA97 je znázornené na obrázku 8.3. Základným cieľom rekonštrukcie jednotlivých zaznamenaných prípadov interakcie bolo identifikovať dráhy častíc, produkovaných v rozpadoch hyperónov, na pozadí veľkého počtu dráh iných častíc, vznikajúcich v zrážke. Hlavným detektorom, umožňujúcim precíznu rekonštrukciu dráh častíc bol kremíkový dráhový detektor (silicon telescope), obsahujúci pixelové a mikrostripové detektory, umiestnený v magnetu Omega. Na výber zaujímavých interakcií podľa ich centrality (počtu

nukleónov z jadier, participujúcich v zrážke) slúžili detektory multiplicity častíc (multiplicity detectors). Systém mnohovláknových proporcionálnych komôr (pad chambers) slúžil na zabezpečenie presnejšieho merania hybnosti častíc s vysokou energiou. Košická skupina v experimente prijala zodpovednosť za vývoj a realizáciu riadiacej a kontrolnej elektroniky pre tieto komory (J. Bán, M. Lupták). Samotnú vyčítavaciu elektroniku pre tento detektor budovala skupina z univerzity v Birminghame, s ktorou majú košickí fyzici dodnes vynikajúcu spoluprácu. V experimente WA97 boli v rokoch 1994 – 1996 získané údaje o p-Be, p-Pb a Pb-Pb zrážkach pri energii 158 GeV na nukleón.



Obr. 8.3. Schéma konfigurácie experimentu WA97. Centrálnym dráhovým detektorom bol kremíkový teleskopický detektor (silicon telescope). Košická skupina bola zodpovedná za vývoj a realizáciu kontrolnej a riadiacej elektroniky pre systém mnohovláknových proporcionálnych komôr (pad chambers)

V štúdiu procesov s produkciou podivnosti sa pokračovalo v rámci experimentu NA57 s podobným usporiadením detektorov, pričom dráhový detektor obsahoval len pixelové detektory (celkom 1 milión elementov) a mnohovláknové komory boli nahradené dvojstrannými kremíkovými mikrostri-

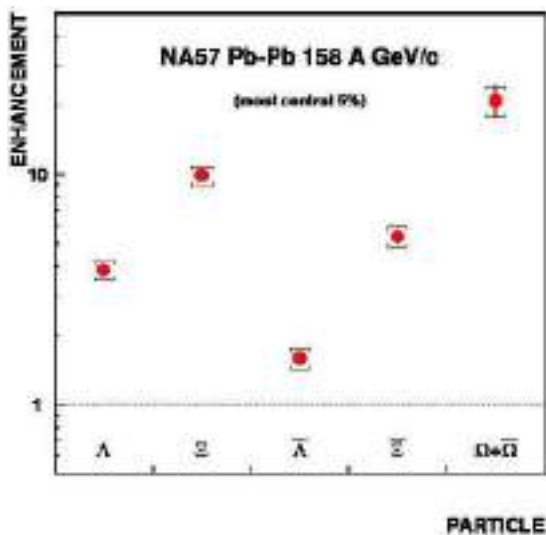


Obr. 8.4. Pohľad na aparáturu experimentu NA57 v magnetu GOLIATH v severnej experimentálnej hale SPS

povými detektormi. Vedúcim experimentu bol Federico Antinori. Pohľad na experimentálnu aparáturu NA57 je na obrázku 8.4. V experimente

NA57 sa zväčšil rozsah merania centrality do oblasti periférálnejších zrážok, a okrem energie 158 GeV na nukleón sa realizovali merania aj pri nižšej energii 40 GeV na nukleón. Experiment získaval údaje o p-Be a Pb-Pb zrážkach v rokoch 1998–2001, posledná práca bola odoslaná na publikovanie do časopisu na sklonku roku 2009. K vybudovaniu experimentu NA57 košická skupina prispela hlavne softvérom na monitorovanie spúšťacieho systému – triggera (A. Jusko).

Experimenty WA97 a NA57 pracovali v období, kedy sa už intenzívne pracovalo na príprave experimentov pre LHC. Obidva experimenty slúžili ako „testovací polygón“ pre prístupy, pripravované pre experimentovanie na LHC. V experimente WA97 bol vo svetovom meradle po prvý raz použitý, vďaka spolupráci na vývojovom projekte RD19 v CERN-e, systém kremíkových pixelových detektorov v úlohe hlavného dráhového detektora. Skúsenosti s pixelovými detektormi v experimentoch WA97 a NA57 viedli priamo ku konštrukcii pixelového detektora SPD pre experiment ALICE na LHC. V experimente NA57 boli úspešne otestované a prototypované prístupy, navrhované pre systém zberu údajov (DAQ) a centrálny rozhodovací a spúšťací systém (trigger) experimentu ALICE.



Obr. 8.5. Jeden z hlavných výsledkov experimentov WA97 a NA57 – závislosť relatívneho zvýšenia výťažkov hyperónov na hodnote podivnosti častice (hyperóny Λ obsahujú jeden, Ξ dva a Ω tri podivné valenčné kvarky s)

Hlavným výsledkom experimentov WA97 a NA57 je pozorovanie a potvrdenie signifikantného zvýšenia výťažkov podivných hadrónov v centrálnych Pb-Pb zrážkach pri energii 158 GeV na nukleón v porovnaní s elementárnejšími p-Pb a p-Be zrážkami. V súhlase s predpoveďami

Rafelského a Müllera sa toto prevýšenie zväčšuje s rastom podivnosti hyperónu, dosahujúc hodnotu ~ 20 pre hyperóny Ω , ktoré obsahujú tri podivné valenčné kvarky. Tieto výsledky ilustruje obrázok 8.5. Získané detailné údaje o zvýšenej produkcii podivnosti v zrážkach ťažkých iónov, jej závislosti od hodnoty podivnosti skúmaných častíc a centrality zrážky sú v dobrom súlade s hypotézou o vzniku QGP. Doteraz sa ich nepodarilo uspokojivo opísať v konvenčných hadrónových modeloch jadro-jadrovej zrážky. Nových údajov je samozrejme viac, treba spomenúť aj analýzu spektier priečných zložiek hybnosti podivných častíc v rámci hydrodynamicky motivovaného prístupu, ktorá ukázala, že pozorované spektrum je kombinovaným dôsledkom termálneho vyžarovania a kolektívneho hydrodynamického rozpínania systému rýchlosťou blízkou polovici rýchlosti svetla. To naznačuje generovanie veľmi silného tlaku, aký možno predpokladať v prípade vzniku QGP. Údaje pri nižšej energii 40 GeV na nukleón dovolili študovať energetickú závislosť produkcie podivných častíc. Efekt zvýšenia produkcie podivnosti je pri nižšej energii výraznejší ako pri maximálnej energii SPS.

Kým v projekte WA97 participovala zo Slovenska len skupina odborníkov z Ústavu experimentálnej fyziky SAV, do experimentu NA57 sa zapojili aj kolegovia z Univerzity P.J.Šafaříka v Košiciach a Univerzity Komenského v Bratislave.

Slovenskí fyzici významne prispeli k spracovaniu a analýze údajov experimentov WA97 a NA57, riešeniu metodických problémov a fyzikálnej analýze. V oblasti metodiky experimentu (selekčné kritériá výberu signálov, stanovenie polohy primárneho vertexu interakcie, produkcia referenčných dátových súborov, metodika a software pre výpočet korekcií údajov na geometrickú akceptanciu a efektívnosť rekonštrukcie prípadov a selekciu signálov,...) výrazne prispeli I. Králik, R. Lietava, L. Šándor a J. Urbán. Na fyzikálnej analýze a interpretácii výsledkov aktívne participovali M. Bombara, A. Kravčáková, I. Králik, R. Lietava, K. Šafařík a L. Šándor. Údaje o p-Be interakciách pri energii 40 GeV, získané v roku 2001, boli kompletne spracované a analyzované v Košiciach a na ich základe Marek Bombara napísal a obhájil pod vedením I. Králika svoju dizertáciu. Slovenskí fyzici (najmä L. Šándor) prezentovali výsledky WA97 a NA57 na celom rade významných medzinárodných konferenciách. Spolu to bolo okolo 25 pozvaných prednášok. Viaceré dlhodobé pracovné pobyty slovenských fyzikov v CERN-e a ďalších spolupracujúcich ústavoch (I. Králik, R. Lietava, K. Šafařík, L. Šándor) výrazne napomohli získaniu kvalitných výsledkov.

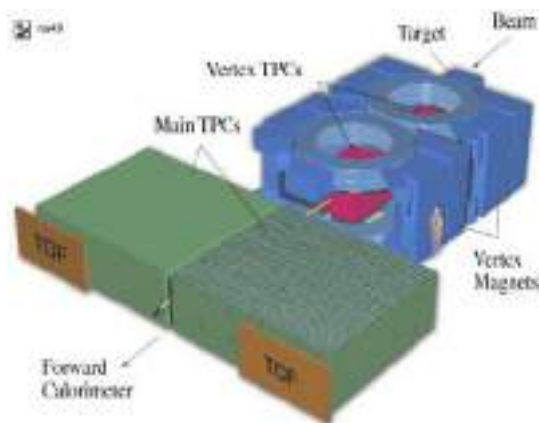
Keď 10. februára 2000 CERN na základe súboru výsledkov viacerých experimentov na SPS oznámil pozorovanie nového stavu jadrovej hmoty s vlastnosťami očakávanými pre QGP, tento výsledok spočíval najmä na troch pilieroch – anomáliách v spektrách dileptónov, zvýšenej produkcii podivnosti a anomálnom potlačení produkcie častice J/Ψ . Je príjemné konštatovať, že k prvým dvom spomenutým témam prispeli aktívne aj slovenskí fyzici. Výsledky, dosiahnuté na slovenských pracoviskách v experimentoch WA97 a NA57 ocenilo v roku 2002 Predsedníctvo SAV udeľením Ceny SAV v oblasti medzinárodnej spolupráce kolektívu pracovníkov ÚEF SAV, PF UPJŠ a FMFI UK v zložení: L. Šándor, A. Jusko, I. Králik, K. Šafařík (ÚEF SAV), J. Urbán (PF UPJŠ) a R. Lietava (FMFI UK). Záber z odovzdávania Ceny SAV je na obrázku 8.6.



Obr. 8.6 Slávnostné odovzdávanie Ceny SAV za výsledky v experimentoch WA97 a NA57 v júni 2002 v Kongresovom centre SAV v Smoleniciach. Na obrázku zľava doprava: Jozef Urbán, Ivan Králik, Ladislav Šándor, predseda SAV Štefan Luby a podpredseda SAV Karol Karovič

9 Experiment NA49

Experiment NA49 bol schválený ako experiment na pevnom terči na urýchľovači SPS v roku 1991. Aktívne naberal dáta do októbra 2002. Získané experimentálne dáta sa stále ešte spracúvajú i dnes, v roku 2013. Detektor NA49 bol navrhnutý ako univerzálny detektor pre štúdium základných charakteristík mnohočasticovej produkcie. Poskytoval unikátnu možnosť priameho porovnania produkcie častíc v protón-protónových (pp), protón-jadrových (pA) a jadro-jadrových (AA) zrážkach pri energii 158 GeV/c na nukleón. To umožňovalo



Obr. 9.1 Trojrozmerný počítačový model experimentu NA49

V roku 2000 vedenie CERN-u oznámilo pozorovanie nového stavu látky s vlastnosťami predpovedanými pre kvarkovo-gluónovú plazmu vznikajúcu v centrálnych zrážkach ťažkých iónov. Významná časť argumentov, ktorá umožnila CERN-u oznámiť tento objav, bola získaná v experimentoch NA49 a WA97, v ktorých veľmi aktívne

kvalitnejšiu identifikáciu rozdielností v týchto procesoch, výsledkom čoho bolo jedno z prvých pozorovaní príznakov produkcie kvarkovo-gluónovej plazmy (QGP).

Základnou charakteristikou experimentu je jeho dobrá akceptancia vo veľkej oblasti fázového priestoru. V experimente boli použité širokoapertúrne supravodivé magnety, vnútri ktorých sa nachádzajú „vertexové“ časovo-projekčné komory (TPC) a za magnetmi sa nachádzajú ďalšie, na svoju dobu naozaj veľké, hlavné TPC komory.



Obr. 9.2 Príklad typického záznamu v zrážke Pb-Pb pri energii 158 GeV/c na nukleón

participovali skupiny fyzikov zo Slovenska. Tieto výsledky sú vo svetových citačných databázach uvádzané ako „top-citované“, teda patriace k najvýznamnejším výsledkom oboru v poslednom období. Kolaborácia NA49 vyprodukovala celkovo do 200 publikácií, ktoré boli citované okolo 5000 krát.

Bratislavská skupina v zložení Juraj Bracíník, Ján Ftáčnik, Vladimír Hlinka, Rudolf Janík, Marian Ivanov, Miroslav Pikna, Branislav Sitár (vedúci skupiny), Peter Strmeň a Imrich Szarka vstúpila do kolaborácie NA49 podpísaním dokumentu „Memorandum of understanding“ v apríli 1997. V priebehu rokov sa v nej vystriedalo okolo 15 fyzikov, doktorandov a študentov Fakulty matematiky, fyziky a informatiky UK.

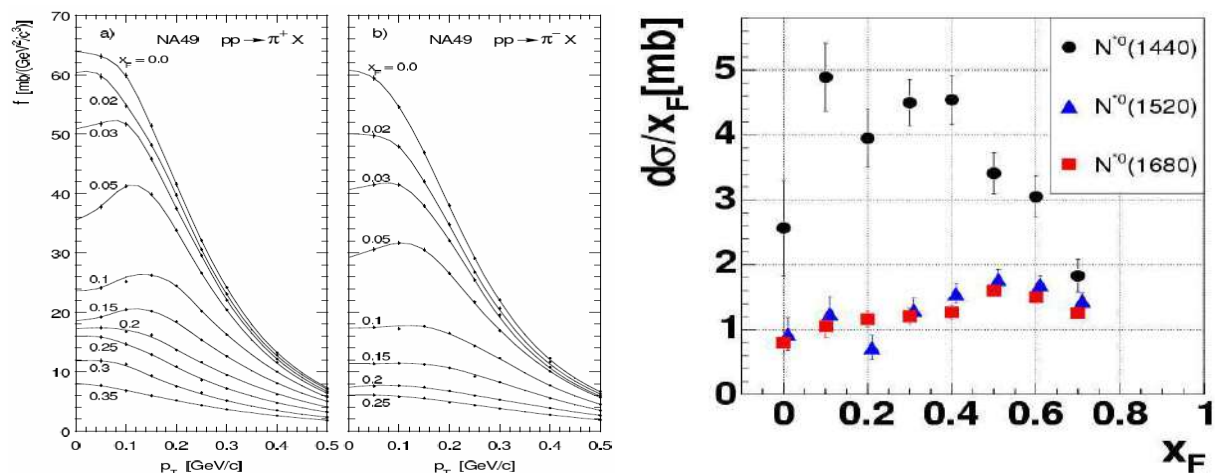
Bratislavskí fyzici spolupracovali hlavne so skupinou vedenou H. G. Fischerom. Okrem aktívnej účasti pri prevádzke spektrometra NA49 v zmenách sa pracovníci z MFF UK, predovšetkým Miroslav Pikna, Juraj Bracíník, Ján Ftáčnik, Michal Kreps výrazne podieľali na konštrukcii novej časovo-projekčnej komory, takzvanej „Gap TPC“. Tá bola pridaná do systému detektora NA49, kde dopĺňala akceptanciu detektora v oblastiach fázového priestoru neúplne pokrytého pôvodnými veľkými TPC komorami. Slováci sa podieľali na stavbe komory ako aj na tvorbe jej softvérového zabezpečenia.

V rokoch 1998–2003 sa bratislavskí fyzici podieľali na tvorbe programového vybavenia na spracovanie údajov z NA 49. Pri spracovaní boli získané poznatky o pp, pA a AA interakciách pri energiách nad 100 GeV na nukleón. Fyzici z Bratislavy vypracovali programový balík „Padres“, ktorý detailne mikroskopicky simuluje procesy v TPC. Program bol použitý na štúdium priestorového rozlíšenia komory. Boli identifikované základné príspevky k rozlíšeniu a bola určená ich relatívna dôležitosť. Po prvý raz sa podarilo pomocou simulácie bez voľných parametrov opísať pozorované priestorové rozlíšenie TPC. Ďalej boli vypracované detailné akceptačné tabuľky pre experiment, ktoré boli používané celým experimentom na korigovanie efektov spojených s neúplnou akceptanciou detektora. Bratislavské pracovisko sa podie-

ľalo aj na kontrole kvality identifikácie nabitých častíc pomocou straty energie častíc pri prelete cez TPC.

Po príchode Vladimíra Černého na NA49 v roku 1998 (viedol potom bratislavskú skupinu od roku 2001 až do roku 2010) sa skupina sústredila hlavne na získanie a spracovanie dát o mnohočasticovej produkcii v pp zrážkach. Z tejto práce pochádzajú najkvalitnejšie svetové dáta o inkluzívnej produkcii piónov, kaónov, protónov, antiprotónov a neutrónov v oblasti SPS energií. Dáta majú bezprecedentnú kvalitu (v zmysle malých štatistických fluktuácií) aj doposiaľ nedosiahnutú štatistiku. To umožnilo signifikantne evidovať doteraz nepozorovanú štruktúru v inkluzívnom spektre priečných hybností, ktorá sa prejavuje zlomom v strmosti až lokálnym poklesom v oblasti malých priečných hybností. Fyzikálna interpretácia tohto javu vyžaduje ďalšie fenomenologické štúdium, je možné že by mohlo ísť o doteraz málo predpokladanú produkciu ťažkých hadrónových stavov a ich následný rozpad. Kvalitné dáta o inkluzívnej produkcii umožňujú napríklad ladiť parametre Monte Carlo generátorov časticových zrážok alebo optimalizovať návrh produkcie neutrónových zväzkov.

Bratislavská skupina významne zdokonalila techniku zmiešavania udalostí (event-mixing) pre spracovanie spektier invariantných hmotností potrebnú pri stanovovaní účinných prierezov produkcie rezonancií. Spolu s unikátnym využitím hadrónového kalorimetra pre detekciu neutrónov smerujúcich dopredu bol tak práve v experimente NA49 prvýkrát získaný priebeh inkluzívnych účinných prierezov všetkých izospinových komponent rezonancie delta. V dizertačnej práci doktoranda FMFI M. Krepsa boli prezentované prvé dáta o inkluzívnej produkcii baryónových rezonancií N^* .



Obr. 9.3 Závislosti inkluzívnej piónovej produkcie od priečnej hybnosti a inkluzívna produkcia rezonancií N^*



Obr. 9.4 Študenti FMFI Mária Martišíková a Michal Kreps s H.G. Fischerom v CERN-e pri výrobe „Gap TPC“ komory

Osobitne treba zdôrazniť úlohu kolaborácie NA49 pre odborný rast bratislavských študentov (v rámci programu letných študijných pobytov v CERN-e) a doktorandov. H. G. Fischer bol veľmi aktívny ako konzultant-špecialista pri prí-

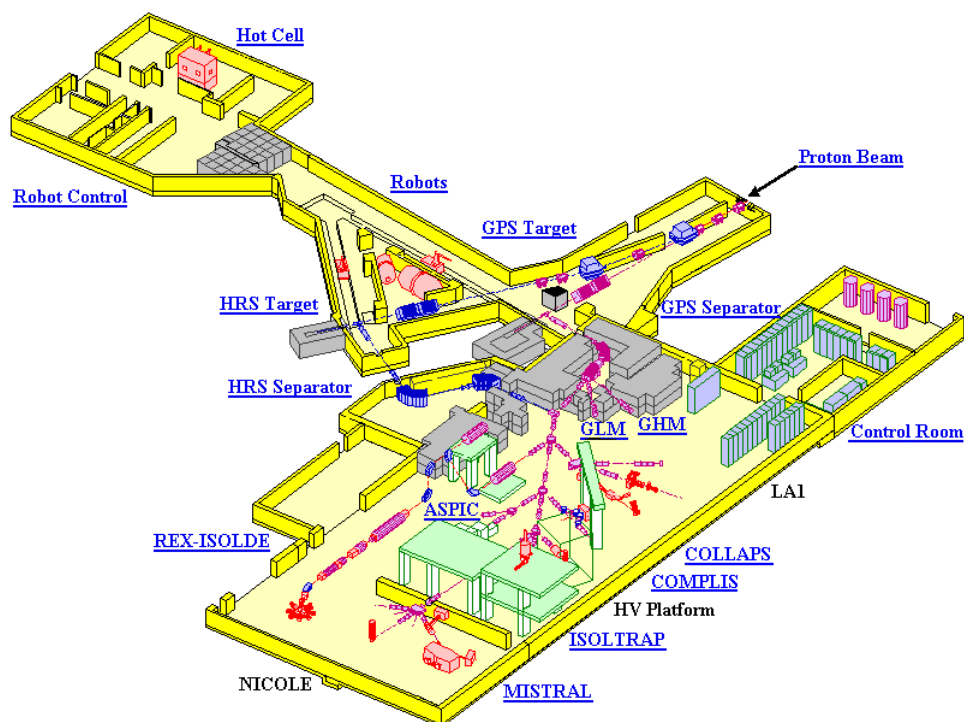
prave dizertačných prác. Naši doktorandi dostali v CERN-e kvalitné školenie a príležitosť pracovať na hrane poznania vo fyzike vysokých energií najmä v oblasti analýzy experimentálnych dát.

10 Experimenty na zariadení ISOLDE

Všeobecný prehľad

Experimentálny komplex ISOLDE (Isotope Separation On-Line DEvice) využíva urýchľovače v CERN-e na produkciu zväzkov exotických, v prírode sa nenachádzajúcich, izotopov. V prevádzke je od roku 1967. Od roku 1992 sú zväzky rádio-aktívnych izotopov produkované ožarovaním

masívneho terča protónmi z urýchľovača Proton Synchrotron Booster (PSB) s energiou 1,4 GeV a intenzitou až do 2 mikroampérov. Aktuálne prebieha rekonštrukcia celého zariadenia (projekt HIE-ISOLDE), ktorý okrem zvýšenia intenzity umožní aj dosiahnutie vyššej energie urýchlených zväzkov.



Obr. 10.1 Schéma komplexu ISOLDE zobrazujúca rozmiestnenie najdôležitejších experimentov

Spektrum meraní realizovaných na ISOLDE je veľmi pestré. Zahŕňa jadrovú, atómovú a molekulovú fyziku, fundamentálnu fyziku, fyziku tuhých látok, ale aj biofyziku a astrofyziku. V rámci ISOLDE pracujú mnohé stabilné zariadenia. Unikátny je iónový zdroj RILIS, ktorý metódou rezonančnej laserovej ionizácie umožňuje selekciu produkovaných izotopov podľa protónového čísla. Tým zabezpečuje vysokú chemickú čistotu zväzku. Urýchľovač REX umožňuje urýchlenie rádioaktívnych zväzkov na energiu 3 MeV na nukleón. Na jeho línii je sféra HPGe detektorov Miniball, ktorej terčová komora môže byť vybavená systémom kremíkových stripových ΔE - E detektorov T-REX. Sféra je využívaná najmä na štúdium kulombovskej excitácie rádioaktívnych zväzkov a v kombinácii so systémom T-REX na štúdium reakcií prenosu nukleónov indukovaných rádioaktívnymi zväzkami. Collaps je zariadenie zamerané na štúdium vlastností základných stavov atómových jadier metódou kolineárnej laserovej spektroskopie. Presné merania hmotností atómových jadier krátko žijúcich izotopov umožňuje systém Penningovej pasce ISOLTRAP. Experimenty v oblasti fundamentálnej fyziky slabých interakcií pokrývajú zariadenia Witch a Nicole. Spektrometer úplnej absorpcie Lucretia, študuje silové funkcie beta rozpadu. Na to využíva dva NaI(Tl) monokryštály, ktoré sú v súčasnosti najväčšie na svete.

Okrem uvedených stabilných zariadení, pre experimenty v rámci komplexu ISOLDE je typické nasadenie malých detekčných zostáv, ktoré sú prívázané externými výskumnými skupinami. Táto možnosť je dôležitá aj pre slovenskú jadrovú fyziku, nakoľko umožňuje stavbu relatívne nenákladných zariadení na domovskom pracovisku a ich následné využitie priamo v CERN-e.

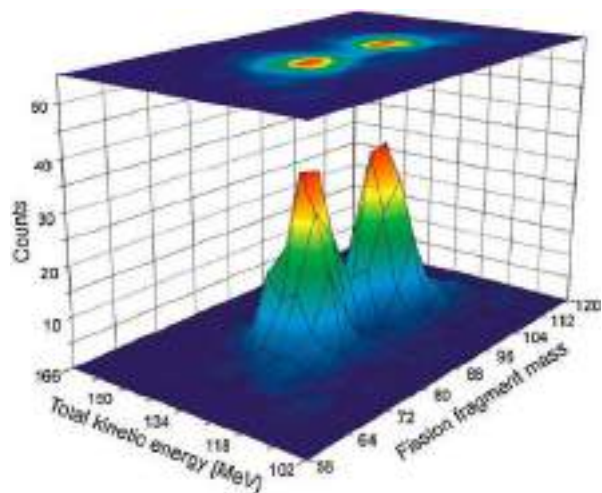
Experiment IS466: Objav nového asymetrického módu štiepenia

Kľúčovým výsledkom experimentu IS466, na ktorom v rámci medzinárodného autorského kolektívu spolupracovali Stanislav Antalic z Univerzity Komenského v Bratislave a Martin Veselský a Martin Venhart z Fyzikálneho ústavu SAV v Bratislave, bol v roku 2008 objav nového asymetrického módu štiepenia v procese beta-oneskoreného štiepenia izotopu ^{180}Tl . Oneskorené štiepenie po beta premene je zriedkavý proces rádioaktívnej premeny, ktorý umožňuje získať unikátne dáta o štiepných bariérach a to aj pre jadrá, ktoré sa neštiepia spontánnym štiepením. V experimente bola využitá selekcia laserovou ionizáciou umožňujúca získanie veľmi čistého zväzku ^{180}Tl . Po prvýkrát bolo pre také ľahké jadro pozorované

asymetrické štiepenie, teda štiepenie s nerovnakou hmotnosťou fragmentov, ktoré na rozdiel od asymetrického štiepenia známeho v oblasti uránu, nemožno chápať ako dôsledok priaznivej energetickej bilancie súvisiacej s vrstvou štruktúrou konečných fragmentov. Práve naopak, symetrické štiepenie na dva fragmenty ^{90}Zr s uzavretou neutrónovou vrstvou $N = 50$ je takmer úplne potlačené. Pozorované asymetrické štiepenie preto musí prebiehať iným, doteraz nepozorovaným mechanizmom. Výsledok bol publikovaný v časopise Physical Review Letters a ešte pred publikáciou vyvolal široký ohlas v podobe článkov v časopisoch Nature News, Science News, Scientific American, IoP Physics World, La Recherche, alebo aj v prestížnom ekonomickom denníku Frankfurter Allgemeine Zeitung.

Experiment IS521: Štúdium štruktúry jadier exotických izotopov zlata

V roku 2011 združenie viacerých výskumných inštitúcií pod vedením Martina Venharta z Fyzikálneho ústavu SAV navrhlo realizovať štúdium štruktúry jadier izotopov zlata. Tieto izotopy umožňujú štúdium fenoménu deformácie atómového jadra. Mechanizmus vzniku tohto javu, napriek tomu, že je predmetom intenzívneho teoretického a experimentálneho výskumu už viac než 50 rokov, je jednou zo základných rokov, je jednou zo základných nezodpovedaných otázok jadrovej fyziky.



Obr.10. 2 Asymetrická hmotnostná distribúcia fragmentov beta oneskoreného štiepenia ^{180}Tl

Experiment bol v plnom rozsahu schválený Vedeckou radou CERN-u a zaradený do programu pod označením IS521. Realizácia experimentu predpokladá vývoj meracej aparatury priamo na Fyzikálnom ústave SAV a jej následný transport do CERN-u. V roku 2012 bol pracovníkmi Fyzikálneho ústavu SAV (Martin Venhart, Martin Veselský, Vladislav Matoušek a Ľubomír Dostál)

s príspevím študentov fakúlt Slovenskej technickej univerzity (Matúš Sedlák z Fakulty elektrotechniky a informatiky, Daniel Kláč z Fakulty informatiky a informačných technológií) skonštruovaný prototyp páskového systému pre transport nestabilných jadier zlata k detektorom, ktorý je založený na páskach typu 8-track, ktoré boli v minulosti využívané na záznam zvuku a videa. Vyznačujú sa jedinou cievkou, na ktorú je navinutá „nekonečná“ slučka pásy so šírkou 6 mm. Toto umožňuje konštrukciu kompaktného a nenákladného systému poháňaného jediným krokovým motorom. Pre vyhodnotenie výsledkov experimentu je vyvíjaný softvér, ktorý využíva knižnicu unikátnych softvérových algoritmov, vyvinutú na Fyzikálnom ústave SAV v uplynulom desaťročí. Za aplikáciu spomínaných algoritmov sú tiež spoluzodpovední aj spomenutí študenti Slovenskej technickej univerzity, ktorí sa vďaka tomu postupne stávajú špičkovými odborníkmi. Získané praktické skúsenosti sú silnou zárukou ich ďalšieho uplatnenia, čo je dôležité najmä v situácii, keď priemyselné podniky v Slovenskej republike, medzi iným oblasťami aj v jadrovej energetike, dlhodobo pociťujú nedostatok mladých technických pracovníkov. Z tohto dôvodu predstavujú práce na príprave experimentu IS521 potenciálnu veľkú pridanú hodnotu pre slovenskú spoločnosť.

Zámer LoI – 095: Štúdium štiepenia izotopov pomocou reakcií prenosu

V budúcnosti sa ráta s pokračovaním výskumu štiepenia exotických jadier s využitím rádioaktívnych zväzkov, či už v procese beta-oneskoreného štiepenia, alebo v procese štiepenia, vyvolaného reakciami prenosu. Využitie reakcií prenosu je predmetom zámeru (Letter of Intent), predloženého pod vedením Martina Veselského z Fyzikálneho ústavu SAV ako časť fyzikálneho programu pre

budované zariadenie HIE-ISOLDE. Počíta sa s využitím reakcií prenosu neutrónu na vyvolanie štiepenia interagujúcich jadier z rádioaktívneho zväzku s energiou 3-5 MeV na nukleón pri nízkych energiách vzбудenia. To umožní presné určenie výšky štiepnej bariéry z pozorovanej excitačnej funkcie štiepenia. Experiment by mal byť vykonaný pomocou aktívneho terča ACTAR-TPC v spolupráci s univerzitami v Leuvene, Liverpoole, Yorku a Jyväskylä. Výhodou použitia aktívneho terča je možnosť odmerať excitačnú funkciu počas jediného experimentu a tým plnohodnotne využiť pridelený čas na urýchľovači na získanie maximálnej možnej štatistiky.

Experiment IS509: Overenie možnosti produkcie beta zväzkov

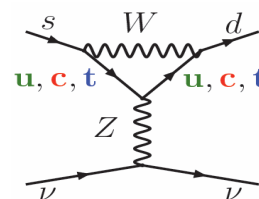
Technologický vývoj realizovaný na ISOLDE s aktívnym zapojením pracovníkov z Fakulty matematiky, fyziky a informatiky Univerzity Komenského (Fedor Šimkovic a Rastislav Hodák) reprezentuje experiment IS509. Tento experiment je zameraný na štúdium možností formovania intenzívnych zväzkov izotopov rozpadajúcich sa beta premenou. Tieto, tzv. beta zväzky, môžu byť v budúcnosti použité na tvorbu intenzívnych zväzkov vysoko-energetických neutrín. Konečným cieľom projektu je návrh zariadenia umožňujúceho produkciu týchto zväzkov, jeho konštrukcia a vykonania testov jeho využitia.

Slovenská republika má zastúpenie vo viacerých ďalších experimentoch (IS456, IS467, IS475, IS506, IS534), realizovaných na ISOLDE. Pracujú na nich vedeckí pracovníci a študenti z Fakulty matematiky, fyziky a informatiky Univerzity Komenského v Bratislave (Stanislav Antalic, Zdenka Kalaninová a Boris Andel) a z Fyzikálneho ústavu SAV v Bratislave (Martin Venhart).

11 Príprava experimentu NA62

Význam experimentu

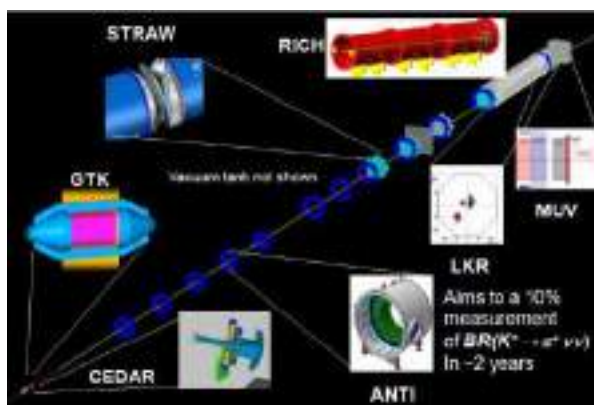
Pripravovaný experiment NA62 v laboratóriu CERN má za cieľ detekciu zriedkavých rozpadov kaónov (niekedy označovaných aj ako K mezóny) s presnosťou, ktorá by mohla významným spôsobom posunúť naše súčasné poznanie materiálneho sveta. Ide o malý počet vopred starostlivo vybraných spôsobov rozpadu, ktorých štúdium môže poskytnúť jasnú evidenciu o existencii nových síl v prírode a o prítomnosti nových častíc.



Obr. 11.1 Príklad zriedkavého rozpadu s kvarku v K mezóne, ktorý vedie na študovaný rozpad $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu$

Vzhľadom na malú hmotnosť kaónov, ktorá je len zhruba polovicou hmotnosti protónu, energia uvoľnená pri študovaných rozpadoch nemôže súperiť s energiou, ktorá je pre tvorbu nových častíc k dispozícii v protibežných zrážkach protónov na LHC. Napriek tomu majú starostlivo vytipované zriedkavé rozpady mimoriadnu dôležitosť. Podľa teoretických výpočtov je príspevok známych častíc štandardného modelu sprostredkujúcich takýto rozpad prirodzene potlačený. Tým je daná príležitosť pozorovať príspevky nových častíc k študovaným rozpadom, prípadne prejavy interferencie známych procesov s novými, doteraz neoverenými. Vďaka pravdepodobnostnej kvantovej povahe sveta je tak možné objaviť prítomnosť nových síl a nových ťažkých častíc nepriamo z meraní starostlivo vybraných zriedkavých rozpadov.

Mohlo by sa preto ľahko stať, že prítomnosť novej fyziky za Štandardným modelom bude prvý raz preukázaná nepriamo v pozorovaniach zriedkavých rozpadov, aké sa v súčasnosti pripravujú v experimente NA62. V prípade pozitívneho nálezu by tak experiment NA62 mohol priniesť zásadné nové objavy. Pre konkrétnu teóriu rozširujúcu štandardný model bude potom možné úzko špecifikovať hmotnosti a náboje nových častíc. Napríklad pre supersymetrické rozšírenie štandardného modelu by sa pozitívny výsledok z NA62 mohol interpretovať ako objav neutralín a chargin s úzko limitovanou hmotnosťou. Pripomeňme, že výsledky na LHC zatiaľ nenaznačujú novú fyziku. NA62 by potom pre urýchľovač LHC poskytol dôležitý smerovník a umožnil nastaviť spúšťače zariadenia na jeho detektoroch ATLAS a CMS pri hľadaní priamych signálov novej fyziky v protónových zrážkach pri vysokej energii.



Obr. 11.2 Subdetektory experimentu NA62. Vákuová trubica dĺžky rádovo 100 m leží na uhlopriečke

O náročnosti experimentu svedčí, že potrebná presnosť je úrovni 10^{-10} . To znamená, že experiment NA62 má za cieľ pozorovať rozpady, ku ktorým dochádza iba jedenkrát z 10 miliárd rozpadov

kaónov. V priebehu dvoch rokov by sme mali zachytiť asi stovku takýchto zriedkavých rozpadov.

Technické prevedenie experimentu

Z urýchľovača SPS, ktorý je predurčľovačom pre LHC, sa vyvedie zväzok protónov, ktorým sa na začiatku haly „North Area“ (odtiaľ skratka experimentu NA) strieľa do pevného terčika. Z vyletujúcich častíc sa magnetickým poľom selektuje sekundárny zväzok, ktorý obsahuje zhruba šesť percent kladne nabitých kaónov s energiou 75 GeV. Zvyšok častíc v tomto zväzku tvoria prevažne kladne nabité pióny predstavujúce pozadie.

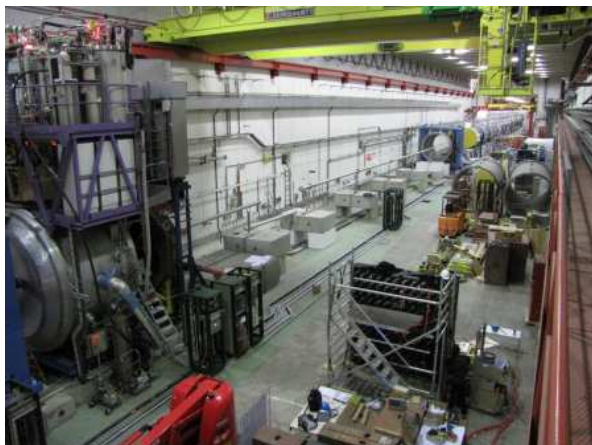
Pozoruhodnou vlastnosťou experimentu je, že takto vzniknutým kaónom sa už nekladie do cesty žiaden ďalší terčik, ktorý by ich zastavil a vynútil ich rozpad v konkrétnom mieste. Kaóny sa preto rozpadajú za letu vo vákuovej trubici dĺžky rádovo sto metrov na základe zákonov kvantovej mechaniky. Séria desiatky subdetektorov tvoriacich experiment NA62 má za cieľ potlačiť pozadie od častejších nezaujímavých rozpadov a zmerať všetky potrebné charakteristiky konkrétnemu prichádzajúcemu kaónu, ktorého rozpad detegujeme, ak prebehol zaujímavým zriedkavým spôsobom, ktorý chceme registrovať.

Doterajšie výsledky a účasť slovenskej skupiny z Univerzity Komenského v Bratislave

Rok 2012 výrazným spôsobom posunul prípravu Experimentu NA62 k úspešnej kompletizácii a spusteniu na jeseň 2014 podľa harmonogramu prípravy, ktorý bol stanovený vedením laboratória CERN. Úspešne sa uskutočnili dva dôležité koordinačné behy, takzvaný suchý beh (júl, august 2012), ktorý bol bez zväzku z SPS, a technický beh (október, november 2012), už so zväzkom. V rámci týchto testovacích aktivít prvý raz prišlo v experimente NA62 k prepojeniu modulov z podsystémov (subdetektorov) vyvíjaných rôznymi skupinami v rámci prípravy jednotlivých subdetektorov. V technickom behu v novembri 2012 boli zaznamenané prvé rozpady kaónov – prvé dáta. Tieto slúžia predovšetkým na testovanie hardvéru a softvéru, ktoré boli doposiaľ vyvinuté, a nie na fyzikálnu analýzu. Pracovná skupina z FMFI UK v Bratislave sa významnou mierou podieľala na týchto aktivitách

Začiatkom roka 2012 podporila skupina v zložení Tomáš Blažek, Vladimír Černý a Roman Lietava návrh koncepcie a tvorbu softvérového zabezpečenia spúšťačieho systému na báze modulu LTU (Local Trigger Unit). Výhodou je prehľadné spojenie subdetektora s centrálnym spúšťačom za behu experimentu (globálny mód) a jednoduchá emulácia centrálného spúšťača pri odpojení subdetektora

pre potreby testovania (lokálny mód). Úlohou bratislavskej skupiny bolo vyvinúť a testovať riadiaci softvér pre LTU.



Obr. 11.3 Inštalácia experimentu NA62, suchý beh, júl 2012

Tento softvér bol vyvíjaný na FMFI UK (V. Černý, M. Koval', R. Lietava, v menšej miere T. Blažek a P. Maták). Postupne bol testovaný na hardvéri LTU posielanom priebežne počas roka do CERN-u dodávateľmi z Veľkej Británie a inštalovanom pracovnou skupinou z Birminghamu. Vážnym testom bol suchý beh i technický beh. Na oboch sa vyvíjaný softvér LTU ukázal ako veľmi úspešný produkt. V stručnosti ho možno vyhodnotiť ako spoľahlivý distribuovaný systém s koncepciou klient-server, vytvorený objektovým programovaním kombináciou technológií C++ (server) a JAVA pre GUI klientské prostredie. Komunikácia využíva systém DIM na báze TCP/IP a správa prostriedkov prebieha v systéme SMI. Uvedené prostriedky umožňujú modulárny prístup k jeho tvorbe a zároveň podporujú mimoriadne jednoduchú inštaláciu a funkčné pripojenie subdetektorov. Ďalšie detaily možno nájsť v príspevkoch členov bratislavskej skupiny na kolaboračných

stretnutiach a v dokumente s názvom NA62 LTU Software User Guide napísanom touto skupinou.

Významným príspevkom pre prevádzku experimentu bol aj podiel M. Koval'a na zmenách pri kontrole funkcionality spúšťacieho systému a monitorovaní priebehu technického behu. V Bratislave vyvinutý softvér LTU sa pri tom ukázal ako spoľahlivý prvok experimentálneho zariadenia.

Na fyzikálnej analýze experimentu pracujú aj doktorandi pod vedením Tomáša Blažeka: Michal Koval' a Peter Maták. Peter Maták dokončuje PhD prácu analyzujúcu príspevky supersymetrie do zriedkavého rozpadu nabitého kaónu na pión a dve neutrína, ktorý je takzvaným zlatým procesom a kľúčovým meraním v prvej fáze experimentu NA62. Na projekte okrajovo spolupracujú aj diplomanti F. Herman a L. Bičian a bakalárski študenti Z. Kučerová a A. Zajac. Ich diplomové, alebo bakalárske práce čiastočne súvisia s fyzikou za štandardným modelom, ktorú by mohol experiment NA62 odhaliť, a tiež čiastočne s technickými otázkami riešenia systému spúšťáča NA62.

Záver

Experiment NA62 má potenciál významným spôsobom ovplyvniť hľadanie novej dynamiky v prírode, ktorú predpokladáme na základe nedostatočnej konzistentnosti štandardného modelu. Prítomnosť nových síl a nových častíc by sa mohla ukázať v sledovaných zriedkavých rozpadoch K mezónov, na ktorých detekciu je zameraný tento experiment. Slovenská účasť na tomto experimente sa ukázala ako úspešná a vyvolala živý záujem medzi študentami FMFI UK. Práce na príprave experimentu NA62 prebiehajú na plné obrátky, aby sa zbieranie prvých dát uskutočnilo podľa plánu na jeseň 2014.

12 Spolupráca slovenských teoretických fyzikov s CERN-om

Výsledky dosiahnuté v minulosti

Aktivity v oblasti teoretickej fyziky vysokých energií na Slovensku tradične motivujú experimentálne bádanie prípadne reagujú na jeho výsledky. História siaha ešte pred vstup Slovenska do CERN-u a je opísaná v druhej kapitole. Viaceré dosiahnuté výsledky vyvolali záujem odbornej verejnosti. Niektoré tu spomenieme.

Otázka tvaru rezonancie ρ

Počas svojho pobytu v CERN-e koncom šesťdesiatych rokov spolupracoval Ján Pišút z Univerzity Komenského s Mattsom Roosom z tamojšieho

Oddelenia teoretickej fyziky. Spoločne vypracovali podrobný popis rezonancie ρ , ktorá sa rozpadá na dva pióny. O dôležitosti tejto štúdie svedčí fakt, že je dodnes citovaná a odkazujú na ňu aj súčasné edície tabuliek vlastností elementárnych častíc.

Problém obchodného cestujúceho

Niektoré problémy riešené v rámci fyziky vysokých energií našli využitie aj v oveľa širšom kontexte. Vladimír Černý z Univerzity Komenského navrhol originálne riešenie problému obchodného cestujúceho pomocou novej metódy takzvaného simulovaného žihania na vyhľadávanie globálnych

extrémov zložitých funkcií. Táto metóda sa dnes často používa v rôznych oblastiach fyziky a informatiky. Veľmi podobné riešenie problému objavila skupina profesora Kirkpatricka v USA.

Produkcia častíc v ultrarelativistických zrážkach ťažkých atómových jadier

Skupina na Univerzite Komenského okolo Jána Pišúta pracovala na viacerých problémoch z tejto oblasti a prispela svojimi výsledkami. Vyvinutý bol napríklad Model mnohočasticovej produkcie v hadrónových zrážkach, ktorý bol založený na Monte Carlo generácii konfigurácií kvarkov a antikvarkov počas časovo-priestorového vývoja zrážky a nasledujúcej rekombinácii kvarkov a antikvarkov na hadróny. Neboli študované len hadróny, ale bol vypracovaný aj Model anomálnej produkcie leptónov a fotónov v hadrónových zrážkach. Schéma využitá v týchto prácach vychádzala z podobnej predstavy časovo-priestorového vývoja hadrónovej zrážky ako v modeli mnohočasticovej produkcie. Študované boli aj rozdelenia priečnej energie v jadrových zrážkach pri energiách urýchľovača CERN SPS. V týchto prácach sa ukázalo, že kvalitatívny popis produkcie priečnej energie sa dá získať z predstavy, v ktorej je zrážka dvoch jadier modelovaná ako súbor dvojčasticových nukleónových zrážok. Úspešná bola aj práca o potlačení častice J/ψ v zrážkach ťažkých iónov. Toto potlačenie bolo merané ako možný prejav kvarkovo-gluónovej plazmy. Ján Pišút, Peter Lichard a Ján Ftáčnik navrhli, že časť pozorovaného potlačenia

častice J/ψ je spôsobená zrážkami tejto častice s hadrónmi produkovanými v zrážke ťažkých iónov. Študované boli aj kvantové javy pri časovom vývoji častice J/ψ a vplyv na jej potlačenie. Tento mechanizmus bol nezávisle navrhnutý aj dvomi skupinami z USA.

Produkcia fotónov a dileptónov v jadrových zrážkach

Takúto produkciu skúmal začiatkom deväťdesiatych rokov v niekoľkých prácach Peter Lichard z Univerzity Komenského spolu s Josephom Kapustom, Davidom Seibertom (University of Minnesota) a Charlesom Galom (McGill University). V týchto prácach bola podrobne spočítaná produkcia fotónov a dileptónov z jadrových zrážok z oboch alternatívnych mechanizmov: v kvarkovo gluónovej plazme ako aj v hadrónovom plyne.

Štúdium vlastností prúdovej trubice medzi kvarkom a antikvarkom v kvantovej chromodynamike (QCD) na mriežke

Štefan Olejník z Fyzikálneho ústavu SAV sa podieľal, v spolupráci so skupinou Adriana Di Giacoma z Univerzity v Pise, na podrobnej analýze rozdelení farebných polí medzi kvarkom a antikvarkom v numerických simuláciách QCD na mriežke. Analýza priniesla priamu evidenciu pre existenciu tenkej prúdovej trubice, preskúmané bolo jej správanie pri fázovom prechode QCD pri konečnej teplote a úloha monopólov v mechanizme uväznenia kvarkov. Časť simulácií a analýzy sa realizovala počas ročného pobytu Š. Olejníka v CERN-e.

Prehľad súčasných aktivít v teórii a fenomenológii vysokých energií na Slovensku

Súčasná aktivita v oblasti teórie a fenomenológie fyziky vysokých energií prebieha na piatich pracoviskách a sú rozdelené po celej krajine: FMFI UK v Bratislave, FU SAV v Bratislave, UEF v Košiciach, FPV UMB v Banskej Bystrici a ELF ŽU v Žiline (obr. 12.1). Celkovo možno hovoriť o skupine asi 20 aktívnych výskumníkov na plný úväzok. Tento počet nezahŕňa študentov a doktorandov.

Tematicky sa dá identifikovať niekoľko okruhov tém, na ktorých slovenskí teoretici pracujú:

- štruktúra hadrónov a jadier v interakciách
- prejavy a vlastnosti silno interagujúcej hmoty
- rozšírenia štandardného modelu, hlavne narušenie elektroslabej symetrie a supersymetrické modely
- fyzika neutrín
- formalizmus kvantovej teórie poľa



Obr. 12.1 Dvadsiaty piaty výročný seminár Triangel, 1993, zľava Zovko, Pišút, Pišútová, Pietschmann, Nagy, Dubníčková

Štruktúra hadrónov a jadier v interakciách

V prvej spomenutej oblasti je aktívna skupina okolo Stanislava Dubníčku a Anny Zuzany Dubníčkovej a spája pracoviská Fyzikálneho ústavu SAV a FMFI Univerzity Komenského. V tejto

skupine pracujú aj Cyril Adamuščín, Erik Bartoš a Andrej Liptaj. Prienikom rôznych projektov je skúmanie a aplikácie elektroslabej štruktúry hadrónov. K ostatným úspechom patrí skonštruovanie unitárneho a analytického modelu pre elektroslabé formfaktory, ktorý bol úspešne aplikovaný na opis viacerých javov štandardného modelu. Na Fyzikálnom ústave SAV sa výskumníci tiež venujú opisu silných interakcií medzi hadrónmi pomocou formalizmu previazaných kanálov.

Rôznymi druhmi jadrových efektov pri produkcii hadrónov v zrážkach elektrónov, protónov alebo jadier s inými jadrami sa zaoberá Ján Nemčík z Ústavu experimentálnej fyziky SAV v Košiciach. Táto tematika je na rozhraní hadrónovej fyziky vysokých energií a skúmania silno interagujúcej hmoty v jadrových zrážkach, pretože získané výsledky sú relevantným popisom prvej časticovej produkcie v týchto systémoch. Aplikáciu nachádza aj pri popise dát získaných kolaboráciou ALICE na LHC.

Prejavy a vlastnosti silno interagujúcej hmoty

Tradícia skúmania prejavov a vlastností silno interagujúcej hmoty, ktorú sme demonštrovali v predchádzajúcom texte, pokračuje aktívne dodnes. S ohľadom na súčasné experimentálne aktivity, tieto bádania sú relevantné predovšetkým pre experimenty ALICE a NA60.

Sem môžeme zaradiť výskum v oblasti kvantovej chromodynamiky na mriežke, ktorému sa venuje Štefan Olejník z Fyzikálneho ústavu SAV. Ústrednou témou je v tomto prípade hľadanie mechanizmu uväznenia kvarkov a ich oslobodenia ako aj obnovenia chirálnej symetrie pri rastúcich teplotách a hustotách energie. Výskum sa tiež zameriava na vyšetrovanie kvalitatívnych vlastností základného stavu QCD.

Na viacerých pracoviskách sa teoretici zaoberajú fenomenológiou hmoty vznikajúcej v ultrarelativistických jadrových zrážkach. Tejto téme sa venujú na Fyzikálnom ústave SAV (Peter Filip), Univerzite Mateja Bela (Boris Tomášik, Evgeni Kolomeitsev) ako aj Žilinskej univerzite (Ivan Melo a Mikuláš Gintner). Medzi témami dominujú rôzne aspekty produkcie hadrónov, hlavne popis priečnej expanzie horúcej zóny a jej anizotropie a kinetický opis produkcie podivných hadrónov.

V režime veľkých baryónových hustôt sa silno interagujúca hmota nachádza v kompaktných hviezdach. Teoretickým skúmaním jej vlastností a prejavov sa zaoberajú fyzici na Fyzikálnom ústave SAV (Emil Běták, Štefan Gmuca, Kristián Petrík) a Univerzite Mateja Bela (Evgeni Kolomeitsev).

Rozšírenia štandardného modelu

Z hľadiska výsledkov z LHC a existujúcich plánov na konštrukciu Medzinárodného lineárneho kolajdera sú zaujímavé teoretické práce Mikuláša Gintnera a Ivana Mela zo Žilinskej univerzity na tému narušenia elektroslabej symetrie. Žilinskí teoretici navrhujú alternatívny mechanizmus, ktorý je konzistentný s aktuálnymi dátami z LHC.

Minimálne supersymetrické rozšírenie Štandardného modelu študuje na FMFI UK Tomáš Blažek s doktorandmi a diplomantmi. Snažia sa odhaliť supersymetriu (SUSY), novú symetriu prírody, na bežiacich experimentoch na LHC, prípadne v zriedkavých rozpadoch kaónov na pripravovanom experimente NA62. Nakoľko v získaných dátach zatiaľ nenachádzame signál supersymetrie, tieto práce obsahujú hlavne zúženie priestoru voľných SUSY parametrov. Povzbudením je objav Higgsovoho bozónu s hmotnosťou menšou ako 140 GeV, v súlade s predpoveďou supersymetrie. Na tomto projekte sa podieľal aj Denis Kochan štúdiom matematických základov kvantovania.

Fyzika neutrín

Aktuálnou problematikou z hľadiska súčasných experimentálnych výsledkov ako aj plánovaných projektov je fyzika neutrín. Na FMFI UK sa tomuto výskumu venuje Fedor Šimkovic, ktorý sa v ostatnom čase hlavne zameriava na fenomén bezneutrínovej dvojitej premeny beta. Pozorovanie tohoto javu by znamenalo, že neutrína sú majoranovské častice, ktoré sú sami sebe antičasticami.

Ako možno vidieť, skúmané projekty v oblasti teoretickej jadrovej a subjadrovej fyziky sú jednoznačne zamerané na prebiehajúce alebo plánované experimentálne aktivity. Tým je zabezpečená dobrá synergia medzi teoretickou a experimentálnou časťou fyzikálnej komunity.