

Fyzika elementárních částic ve Fyzikálním ústavu dnes a zítra

Jiří Chýla a kolektiv¹

Výzkumný program Sekce fyziky elementárních částic je uskutečňován, obdobně jako je tomu v této oblasti fyziky na celém světě, v rámci velkých mezinárodních kolaborací, které své experimenty provádějí v několika hlavních střediscích, kde jsou k dispozici mohutné urychlovače. Ústředním motivem všech těchto experimentů je zkoumání struktury hmoty na subjaderných vzdálenostech a podstaty sil tam působících. Základní informace o současném stavu našich znalostí mikrosvěta, tvořící tzv. **standardní model (SM)**, jsou shrnuty v článku k 50. výročí založení FZÚ [1]. V něm najde čtenář také stručný přehled otevřených otázek dnešního SM a nástin teoretických směrů, které na tyto otázky SM hledají odpověď. Krátký přehled základních pojmů SM najde čtenář i v Dodatku na konci tohoto textu.

Těžištěm experimentálního programu sekce je účast na dvou probíhajících experimentech – **H1** v **DESY** a **DØ** ve **Fermilab** - a na přípravě experimentu **ATLAS** v **CERN**. Jedním z nejpozoruhodnějších rysů moderní fundamentální fyziky je stále zřejmější propojení zákonitostí mikrosvěta, tradičně doména fyziky elementárních částic, s jevy makrosvěta, jak je tradičně zkoumají astrofyzika a astronomie. Spontánně tak vzniká obor „částicové astrofyziky“, jehož hlavním cílem je výzkum vlastností kosmického záření, které k nám z vesmíru přichází a které – možná – v sobě skrývá odpovědi na největší záhady mikro i makrosvěta. Naše sekce se ve spolupráci se Sekcí optiky FZÚ účastní na jednom z velkých mezinárodních projektů v této oblasti - projektu **Observatoře Pierra Augera**, jež se buduje v Argentině.

Kromě těchto velkých projektů, z nichž každého se z FZÚ účastní 10-20 fyziků a inženýrů, se menší měrou podílíme i na několika dalších experimentech v CERN. Nedílnou součástí našeho programu je také všestranný **teoretický výzkum** a řadu let se věnujeme i otázce **využití svazků částic v lékařství**. Základní údaje o všech našich současných aktivitách a jejich návaznosti na experimenty, na nichž jsme se podíleli v minulosti, jsou obsaženy v [1]. Cílem tohoto textu je seznámit čtenáře s pokrokem, jehož bylo v našich hlavních aktivitách v poslední době dosaženo a nastínit, co ve střednědobém horizontu očekáváme v budoucnu.

Experimenty ve fyzice částic jsou charakteristické dlouhodobým časovým horizontem: od návrhu detektoru, přes jeho vývoj a stavbu až po zpracování výsledků experimentu uplyne typicky 20 let. Podobný, či spíše ještě delší časový rámec platí pro vývoj a stavbu samotných urychlovačů. Urychlovač protiběžných svazků protonů **LHC** v **CERN**, jenž má být v roce 2007 spuštěn, bude na dobu 10-15 let největším urychlovačem na světě. **ATLAS** a další experimenty na **LHC** slibují přinést zásadně nové, a jak doufáme i nečekané, poznatky, které pomohou odpovědět na některé z otázek, na něž dnešní **SM** nezná odpověď (jejich stručný výčet lze nalézt v [1]). Dnes sice ještě nevíme, co experimenty na **LHC** přinesou, převažuje však názor, že **LHC** spíše jen naznačí, kde leží klíč k záhadám mikrosvěta. Panuje všeobecná shoda, že pro jejich podrobnější objasnění jsou nejvhodnější srážky elektronů s pozitrony při co největších energiích, neboť ty jsou daleko „čistší“ než srážky protonů s protony na **LHC**. Z hlediska technické realizace a ceny se v současné době jako nejlepší jeví lineární urychlovač, na němž bude docházet k čelným srážkám protiběžných svazků elektronů a pozitronů. Vzhledem k finanční i technické náročnosti stavby takového urychlovače se obec fyziků částic shodla na tom, že je tento tzv. **Mezinárodní lineární srážec** (International Linear Collider, dále jen **ILC**) celosvětovým projektem. V loňském roce došlo ke klíčovému rozhodnutí mezinárodního řídicího výboru **ILC** týkající se výběru technologie urychlování. Již po několik let pracují také mezinárodní skupiny fyziků, kteří vyvíjejí nové typy detektorů částic. Pracovníci FZÚ se v rámci projektu **CALICE** podílejí na návrhu a vývoji elektromagnetického a hadronového kalorimetru.

Pro účinné zapojení do zmíněných experimentů je nezbytným předpokladem napojení na sítě distribuovaného počítání (**gridy**). I do jejich vývoje jsme zapojeni.

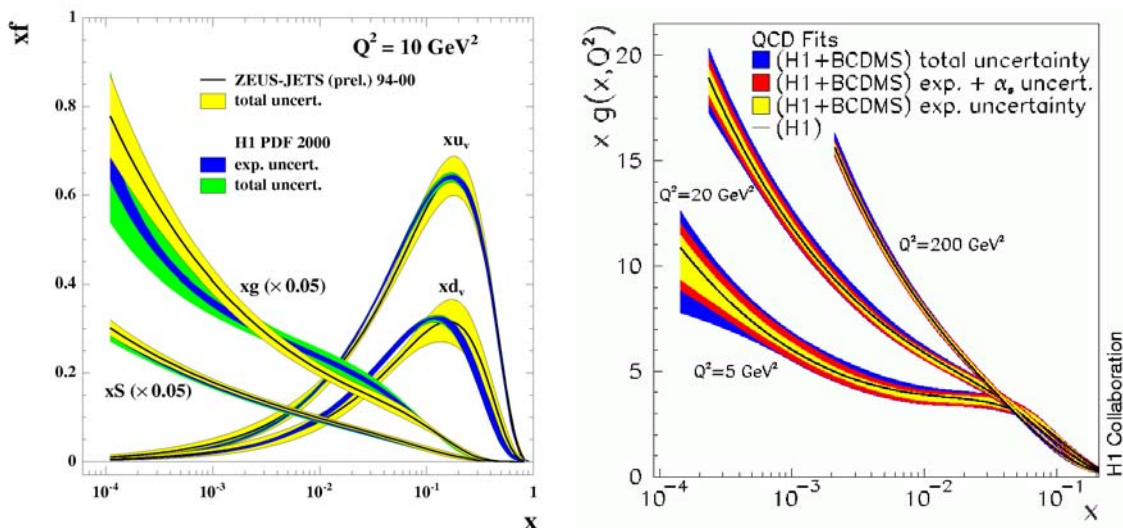
¹ J. Cvach, J. Chudoba, A. Kupčo, M. Lokajiček, J. Niederle, P. Reimer, R. Šmída, V. Vrba

Experiment H1 na urychlovači HERA v DESY

Studium struktury protonu na vzdálenostech menších než je jeho poloměr, tj. zhruba 1 femtometr, bylo hlavní motivací pro vybudování urychlovače HERA v DESY v Hamburku. Na tomto urychlovači se každých 96 nanosekund srážejí protiběžné svazky elektronů či pozitronů o energii 27.6 GeV s protony o energii 920 GeV. FZU se účastní experimentu H1 od samého počátku. První data byla zaznamenána v roce 1992.

Detektor H1 měří energetická a úhlová rozdělení částic v koncovém stavu – rozptýleného elektronu a ostatních detegovatelných produktů srážky. Podle současných představ může nalétávající elektron interagovat s konstituenty protonu - kvarky a gluony – například prostřednictvím výměny virtuálního fotonu. Čím větší část hybnosti elektronu virtuální foton předá protonu, tím větší je rozlišení, se kterým vnitřní strukturu protonu „vidíme“. Mírou „tvrdosti“ srážky je přitom čtverec předané čtyřhybnosti $Q^2 = 2EE'(1-\cos\theta)$, kde E a E' jsou energie primárního a rozptýleného elektronu v laboratorní soustavě a θ je úhel rozptylu (veličiny E' a θ jsou v případě nepružného rozptylu nezávislé proměnné). V rámci **kvark-partonového modelu**, který slouží jako základní teoretický rámec pro popis „tvrdých“ srážek, se při nich proton chová zhruba jako svazek vzájemně neinteragujících kvarků, na nichž se elektron pružně rozptyluje. Proměnná x má v tomto modelu význam části energie protonu nesené kvarkem na němž k rozptylu došlo. Sofistikovanější popis struktury protonu podává **kvantová chromodynamika**, podle níž jsou kvarky v protonu obklopeny „chomáčem“ gluonů, jež mohou v důsledku kvantových fluktuací přecházet v kvark-antikvarkové páry a tím generovat „moře“ kvarků a antikvarků různých vůní.

Srážky elektronů či pozitronů s protony mohou ovšem probíhat i prostřednictvím výměny nabitého virtuálního intermediálního bosonu W^+ (viz. Dodatek), při nichž se elektron mění na elektronové neutrino, jež ovšem v detektoru nelze pozorovat. Tyto procesy se s procesy s výměnou fotonu doplňují, neboť na rozdíl od nich jsou odlišně citlivé na různé typy kvarků a antikvarků. Skutečnost, že experiment H1 měří oba typy procesů, umožňuje určit závislost **distribučních funkcí** jednotlivých vůní kvarků, antikvarků a gluonů na proměnné x . Tato rozdělení (Obr. 1) ukazují, že při hodnotách proměnné x blízkých k jedné dominují kvarky,



Obr. 1. Vlevo: distribuční funkce valenčních kvarků (u_v , d_v), mořských kvarků (S) a gluonů (g) získaných ze fitů dat experimentu H1 (tlustá modrá křivka s chybou udanou zeleným pruhem) a ZEUS (černá křivka s neurčitostí udanou žlutým pruhem) v rámci kvantové chromodynamiky pro $Q^2 = 10 \text{ GeV}^2$. Vpravo: distribuční funkce gluonů v protonu pro tři různé hodnoty Q^2 , získané stejným způsobem z dat experimentů BCDMS a H1.

Všechny distribuční funkce jsou pro lepší grafickou reprezentaci vynásobené x .

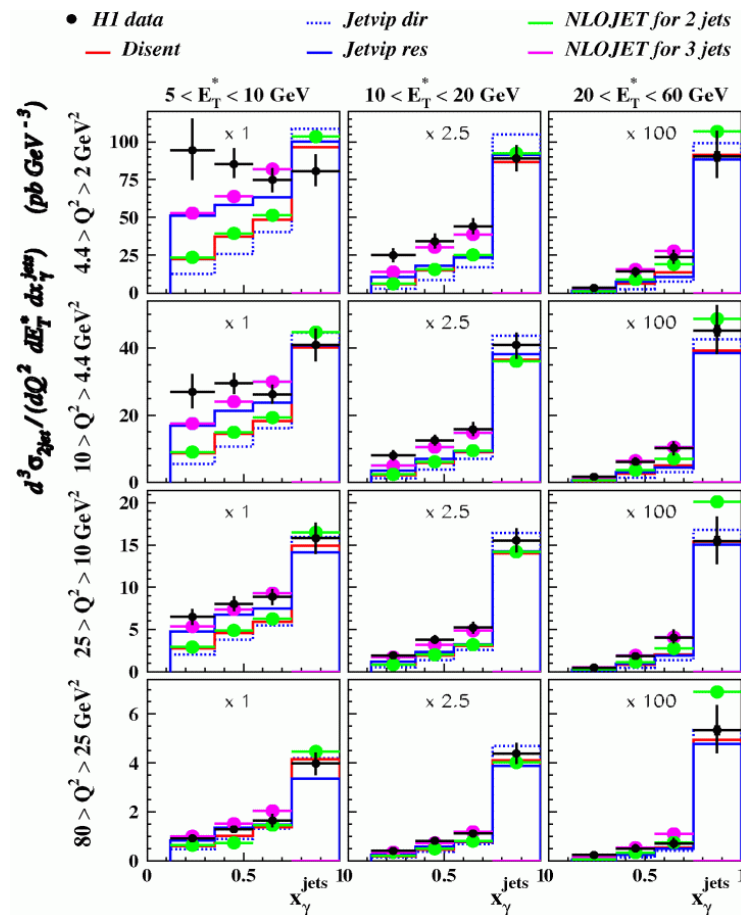
pro malá x pak gluony. Rozdělení mořských kvarků a gluonů, a to i po vynásobení proměnnou x , rostou pro x blízké nule, což má za následek, že integrál přes tyto distribuční funkce

diverguje. To znamená, že se proton ve tvrdých srážkách nechová jako systém s dobře definovaným a konečným počtem konstituentů, jako např. atomové jádro, ale jako systém, jehož počet konstituentů je proměnný.

Experiment H1 také nedávno změřil zastoupení tzv. „těžkých“ kvarků **c** (charm) a **b** (bottom) v protonu [2]. Data ukazují, že zhruba čtvrtinu kvarků a antikvarků v protonu tvoří páry *c*/anti-*c* a asi 2% páry *b*/anti-*b*. Hodnoty proměnné *x* u těchto kvarků jsou přitom velmi malé, protože tyto těžké kvarky i antikvarky vznikají z „moře“ gluonů.

V letech 2000-2001 proběhla modernizace urychlovače HERA i aparatury H1, jejichž cílem bylo výrazně zvětšit množství získaných dat, poskytnout svazky polarizovaných pozitronů či elektronů a umožnit fyzikální měření v nových kinematických oblastech. Urychlovač HERA, který je vlastně největším „mikroskopem“ na světě, má zůstat v provozu do poloviny r. 2007, tedy zhruba do okamžiku plánovaného spuštění LHC. Do té doby lze očekávat, že experiment H1 přinese další zpřesnění dat o struktuře protonu. Detailní znalost distribučních funkcí kvarků a gluonů v protonu, především v oblasti velmi malých hodnot $x \leq 10^{-4}$, bude přitom velmi důležitá pro správnou interpretaci dat z LHC a tím pádem i pro schopnost experimentů ATLAS a CMS identifikovat projevy „nové fyziky“.

V roce 2004 završila skupina pracovníků FZÚ několikaletý výzkum dynamiky srážek tzv.



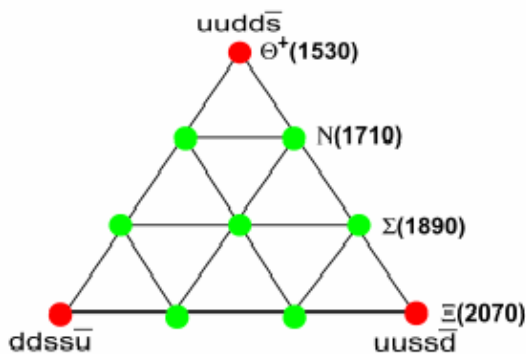
Obr. 2: Srovnání účinného průřezu produkce dvojice jetů (černé body) s třemi předpověďmi QCD, které nezapočítávají efekty struktury fotonu (plně červené a zelené a tečkované modré histogramy) a dvěma (modré histogramy a fialové body), jež tyto efekty započítávají.

virtuálních fotonů s protony publikací práce [3], která ukazuje, že i virtuální fotony mají v jistém smyslu „strukturu“. Připomeňme, že většina fotonů, se kterými se v běžném životě setkáváme ve formě elektromagnetického záření, jsou fotony reálné, tj. mají nulovou klidovou hmotnost. Virtuální foton je kvantově mechanický objekt, jehož „doba života“ je nepřímo úměrná předané čtyřhybnosti $\sqrt{Q^2}$. Po dobu svého života může virtuální foton fluktuovat do páru virtuální částice-antičástice (např. na elektron a pozitron nebo kvark a jeho antikvark). V důsledku toho můžeme hovořit o struktuře fotonu podobně, jako je tomu v případě protonu a zavést distribuční funkce kvarků a gluonů ve fotonu jako funkce x_γ , jež má podobný význam jako x u protonu. Jejich tvary jsou ovšem díky jiné vnitřní dynamice fotonu odlišné od distribučních funkcí protonu, zachycených na obr. 1. O struktuře fotonu se lze dozvědět například měřeními vlastností koncových stavů srážek elektronu s protonem v nichž vznikají jety² s různými

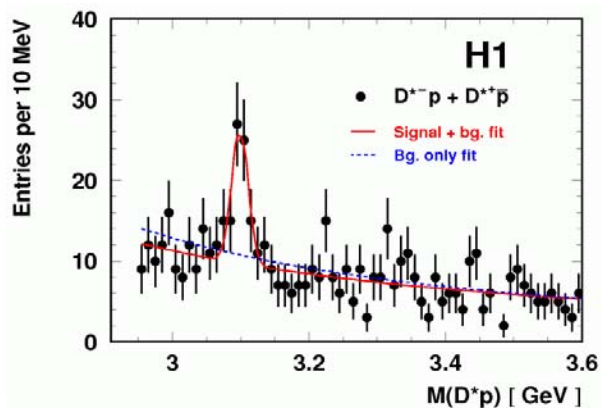
² Na malých vzdálenostech, tj. v interakcích s velkým přenosem hybnosti, je síla mezi barevnými kvarky a gluony v jistém (ale netriviálním) smyslu slabá a pro její popis lze pak použít

energiemi E_t . Pokud je doba života fotonu, úměrná $1/\sqrt{Q^2}$, kratší, než doba po níž interaguje s protonem, jež je úměrná $1/E_t$, foton „nemá čas“ na to, aby se přeměnil na pár kvark-antikvark a jeho struktura se proto neprojeví. Foton v tomto případě interaguje jako celek, což se projeví píkem v účinném průřezu v oblasti $x_\gamma \sim 1$. Ze srovnání změřeného účinného průřezu produkce dvojice jetů jako funkce x_γ a virtuality fotonu Q^2 , znázorněného na obr. 2 černými body, s předpověďmi kvantové chromodynamiky (různé barevné histogramy) plyne, že teorie popisuje měření nejlépe (byť ne dokonale), pokud bere do úvahy strukturu virtuálního fotonu (fialové body a modrá čára). Současně je patrné, že nejhorší souhlas dat s teorií je v oblasti malých hodnot Q^2 a x_γ . Máme představu, jak vysvětlit i tento zbývající nesouhlas teorie a dat, ale k jejímu prověření je potřeba dalších složitých výpočtů, které zatím chybí. Studium vlastností virtuálního fotonu představuje velmi důležitou prověrku poruchového počtu v kvantové chromodynamice, k níž pracovníci FZÚ výrazně přispěli.

Během posledních dvou let došlo k objevu nového typu baryonů, jež jsou interpretovány jako vázané stavy pěti kvarků (odtud název „pentakvarky“), přesněji řečeno čtyř kvarků a jednoho antikvarku, tedy $qqq\bar{q}$. Tyto stavy sice nejsou v žádném zásadním rozporu se základními



Obr. 3: Dekuplet (či přesněji antidekuplet) baryonů, které jsou tvořeny čtyřmi kvarky a jedním anti-kvarkem. Červeně jsou označeny stavy, které nelze vysvětlit jako kombinace tří kvarků.

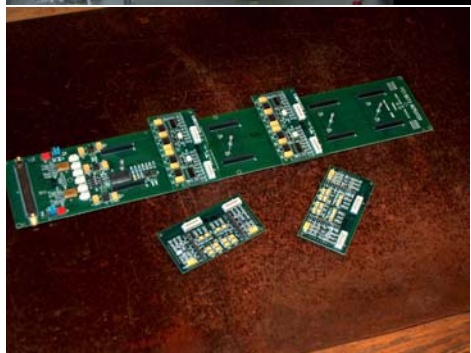


Obr. 4: Rozdělení invariantní hmotnosti dvojice D^*p a jejich antičástic, svědčící o existenci částice s hmotností 3.1 GeV, jejíž kvarkové složení odpovídá půvabnému pentakvarku θ_c^0

teoretickými představami o charakteru sil mezi kvarky, jak je popisuje kvantová chromodynamika, ale přesto byl jejich objev neočekávaný, neboť všechny dosavadní pozorované baryony lze chápat jako vázané stavy tří kvarků. První pentakvark, označovaný θ^+ a složený z pětice $uudd\bar{s}$ o hmotnosti 1.54 GeV, byl objeven ve srážkách fotonů s neutrony v polovině roku 2003 a od té doby je hledání dalších takových stavů věnována značná experimentální pozornost. S ní jde ruku v ruce výrazné oživení zájmu o kvantitativní výpočty v rámci kvarkového modelu, neboť existence pentakvarků přináší důležité a dosud chybějící informace o povaze sil mezi kvarky na vzdálenostech srovnatelných s poloměrem protonu, tj. 1 femtometrem, kde nelze použít standardní metody poruchové teorie. Jsou-li základní představy o povaze částice θ^+ správné, měl by existovat celý (anti)dekuplet podobných pentakvarků, znázorněný na obr. 3. Data z některých dalších experimentů skutečně ukazují na možnou existenci dvou dalších předpověděných pentakvarků, ale situace není zcela vyjasněna. Otázka existence pentakvarků je v současné době bezesporu jedním z nejdůležitějších problémů teorie sil mezi kvarky.

poruchový rozvoj v parametru, který je analogem elektrického náboje. S rostoucí vzdáleností však síly mezi kvarky a gluony rostou, což se projeví tím, že v koncovém stavu pozorujeme pouze bezbarvé částice – hadrony. Místo kvarků a gluonů, vznikajících ve tvrdé srážce hadronů pozorujeme jety, úhlově kolimované shluky hadronů, které mají charakteristiky (především celkovou hybnost) podobné jako původní kvarky a gluony.

Hledáním pentakvarků se zabývá také experiment H1. V roce 2004 v něm byla při analýze koncových stavů obsahujících mezony složené z půvabného antikvarku pozorována částice o hmotnosti kolem 3.1 GeV (viz. obr. 4), jíž lze interpretovat jako pentakvark $uudd\bar{c}$, označovaný θ_c^0 [4]. Tato částice, jež je svým složením analogická částici θ^+ , dosud v žádném jiném experimentu pozorovaná nebyla, podobně jako další pentakvark $ssdd\bar{u}$ objevený v CERN. Problém s pentakvarky spočívá nejen ve faktu, že řada významných experimentů s obrovskými statistikami údajů uvedené částice nepozoruje, ale i v tom, že experimenty, které je vidí, uvádějí poněkud rozdílné hodnoty jejich důležitých parametrů, jako jsou hmotnost a pološířka. Další jejich základní vlastnosti jako je spin, se zatím nepodařilo určit. Z těchto důvodů se bude i experiment H1 v následujících dvou letech intenzivně zabývat jejich hledáním a podrobným zkoumáním. V roce 2005 se provádí detailní ověřování vlivu pozadí a detektoru na pozorování pentakvarků. V brzké době bude studium rozšířeno na novou statistiku případů nedávno získaných s inovovanou aparaturou. Výzkum v tomto směru je součástí našeho dlouhodobého programu výzkumu existence a vlastností částic obsahujících půvabný kvark, kde



Obr.5: Detektor FST. Vlastní křemíkové senzory jsou v horní části, elektronika vyrobená v FZÚ je namontovaná pod chlazením v dolní části detektoru a v detailu dole.

zejména v baryonovém sektoru existuje řada teoreticky předpověděných stavů, jež nebyly dosud pozorovány.

Důležitou součástí detektoru H1 jsou vrcholové křemíkové detektory FST (Forward Silicon Tracker) a BST (Backward Silicon Tracker), jež jsou ze všech částí detektoru H1 nejbližší bodu, v němž dochází ke srážkám elektronů s protony. Tyto detektory jsou důležité pro přesné měření úhlů, pod kterými částice ze srážky vylétají a také pro stanovení bodu rozpadu krátkožíjících částic, jako jsou právě částice obsahující kvarky c a b , které v těchto srážkách mohou vznikat. Ve FZÚ byla vyvinuta a vyrobena elektronika (obr. 5), která je umístěna těsně u stripových křemíkových detektorů. Jedná se o šest souprav elektronických desek pro FST a šest souprav pro BST. Tento celek je dálkově napájen z konvertorových desek rovněž vyvinutých v našem ústavu. Protože se elektronické bloky nacházejí v těsné blízkosti bodu srážek, jsou snadno zranitelné v případech, že urychlovač nepracuje spolehlivě a svazek může přímo zasáhnout detektory. K tomu bohužel došlo po rozsáhlé rekonstrukci urychlovače v letech 2000-2. Z toho důvodu bylo nutno celý elektronický systém přepracovat, na kritických místech použít součástky radiačně odolné a celý systém vyměnit. Návrh nových modulů byl vypracován v našem ústavu a kompletní nová elektronika byla v experimentu H1 instalována na podzim 2004.

V posledních letech se na experimentu H1 podílelo 6 fyziků (J. Cvach, I. Herynek, J. Hladký, P. Reimer, K. Sedlák, J. Zálešák) a tři inženýři (M. Janata, I. Kacl a I. Polák).

Experiment DØ na urychlovači Tevatron ve Fermilab

Experiment DØ zkoumá od roku 1992 srážky protiběžných svazků protonů a antiprotonů. Mezi nejdůležitější výsledky získané do roku 1996, kdy urychlovač poskytoval svazky protonů a antiprotonů o energiích 900 GeV, patří objev top kvarku a změření jeho hmotnosti, přesná měření hmotnosti bosonu W a vazbových konstant elektroslabých a silných sil, měření produkce b-kvarku a jetů s velkými příčnými hybnostmi [5].



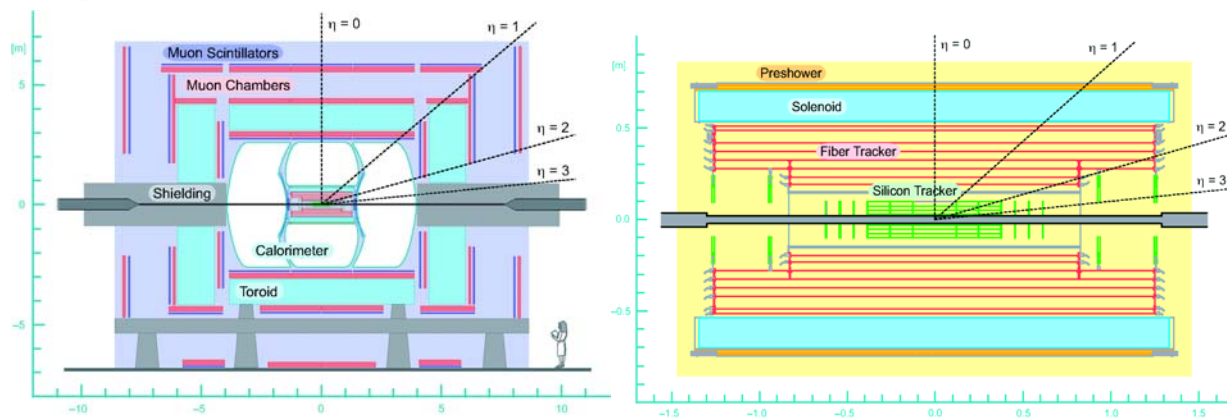
Obrázek 6: Letecký pohled na laboratoř Fermilab u Chicaga.

Modernizace urychlovače, která proběhla v letech 1996-2001, zvýšila jeho luminositu. Tato veličina, která je dána intenzitou svazků a jejich geometrií, určuje počet srážek antiprotonů s protony a tím ovlivňuje šanci zaznamenat řídké procesy, jež mohou přinést svědectví o nové fyzice. Byla také zvýšena energie svazků z 900 GeV na 980 GeV, což zdatelně zvýšilo četnost produkce těžkých částic (např. top kvarku asi o 40%).

Souběžně s modernizací urychlovače probíhala i modernizace detektoru DØ, jehož schéma je zobrazeno na obr. 7. Byla vyměněna veškerá elektronika, aby byl detektor schopen zaznamenávat zvýšený počet srážek,

neboť po modernizaci urychlovače k nim dochází s 6 krát vyšší frekvencí než dříve.

Dále byly instalovány nové subdetektory, především dráhový detektor vložený do magnetického pole o indukci 2T. Prostorové rozlišení tohoto detektoru umožňuje rekonstrukci sekun-



Obrázek 7: Schematické znázornění detektoru DØ během Run II. Celkový pohled (levý obrázek) a detail dráhového detektoru uvnitř kalorimetru (pravý obrázek).

dárních vrcholů vzniklých rozpadem mezonů obsahujících kvarky c nebo b. Důležitou součástí modernizace detektoru DØ bylo i rozšíření mionového detektoru o dopřednou část a instalace mionových scintilačních detektorů, jež umožňují rychle rozpoznat přítomnost mionů, které jsou často příznakem zajímavých jevů, a tak co nejvíce těchto zajímavých případů zaznamenat.

Náš příspěvek do modernizace detektoru DØ se týkal především mionového subdetektoru, (obr. 8). Ve FZÚ jsme vyrobili ve spolupráci s MFF UK 12 vysokonapěťových rozvodných skříní pro napájení mionových detektorů. Přímou ve Fermilab jsme pak pracovali na testování a instalaci kalibračního zařízení pro mionové scintilační detektory.



Obr. 8: Vlevo: Zdeněk Kotek při kontrole vysokonapěťových rozvodných skříní pro mionový detektor v laboratoři FZÚ. Vpravo: Alexander Kupčo a Karel Soustružník (MFF UK) při instalaci kalibračního zařízení pro mionové scintilační detektory ve Fermilab.

Další náš příspěvek spočíval v testování křemíkových sensorů pro dráhový detektor. Naši pracovníci testovali po dobu 1 roku přímo u výrobce kvalitu těchto sensorů před zasláním do Fermilab. Počátkem roku 2001 byla modernizace celého detektoru DØ dokončena a v březnu 2001 začala druhá etapa experimentu.

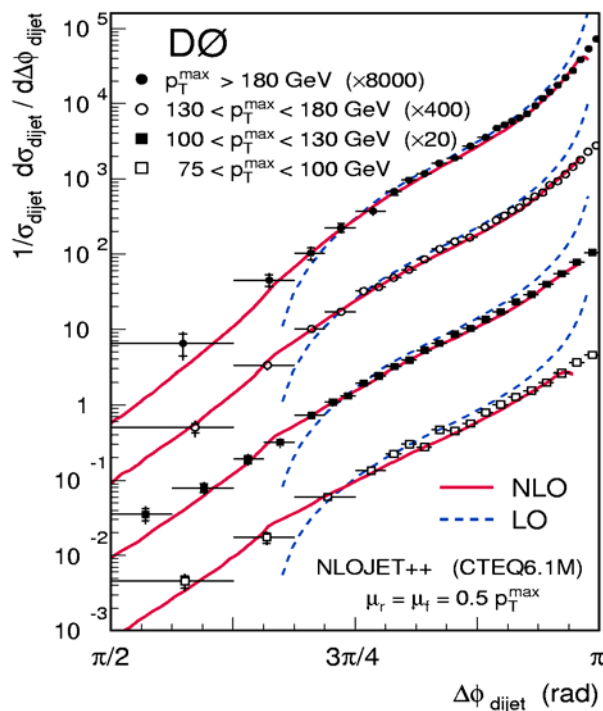
Hlavním cílem je zaznamenat co největší počet srážek a získaná data použít jednak pro zpřesnění dřívějších měření a dále pro hledání nových částic a jevů předpověděných různými teoriemi, jež jdou za rámec standardního modelu. Do první kategorie patří například přesnější měření hmotností top kvarku a intermediálního bosonu W. Tyto hmotnosti jsou ve standardním modelu přímo svázány s hmotností Higgsova bosonu a jejich znalost dovoluje odhadnout hmotnost Higgsova bosonu. Do druhé kategorie pak kromě supersymetrických částic patří především hledání Higgsova bosonu. Pokud existuje a jeho hmotnost není výrazně vyšší než současný experimentální limit 115 GeV, má experiment DØ jistou šanci Higgsovův boson pozorovat dříve než experimenty na LHC v CERN.

Rozšíření fyzikálního programu DØ bylo umožněno právě díky výše zmíněnému dráhovému detektoru, jenž pomáhá identifikovat a zrekonstruovat rozpadové módy různých hadronů, jako jsou např. rozpady hadronů obsahujících b-kvark, které jsou citlivé na mechanismus narušení tzv. CP invariance.

Ve FZÚ se zabýváme převážně analýzou nových dat týkajících se produkce jetů. Měřením produkce jetů s velkými příčnými hybnostmi získáváme znalosti o struktuře hmoty na velmi malých vzdálenostech. V experimentu DØ byly zaznamenány jety s příčnými hybnostmi až 600 GeV/c, což odpovídá řádově vzdálenostem 10^{-16} cm. Porovnáním s předpověďmi QCD tak lze prověřit naše současné představy o silných silách až do vzdáleností jedné tisícinu poloměru protonu. Nadprodukce jetů s velkou příčnou hybností by mohla být signálem, že kvarky a gluony nejsou bodové, jak se jeví dosud, ale že mají substrukturu. Předběžné výsledky analýzy produkce jetů s velkou příčnou hybností jsme prezentovali na mezinárodních konferencích [6].

I když vše nasvědčuje tomu, že kvantová chromodynamika je správnou teorií silných interakcí, je stále nutné ji konfrontovat s novými experimentálními daty. Pokud například dojde k pružné srážce dvou partonů pocházejících z protonu a antiprotonu, musí v důsledku zachování hybnosti vylétající partony (a tedy i jim odpovídající jety) svírat v rovině kolmé na osu svazku úhel $\Delta\phi=180^\circ$. Pokud ovšem v takové srážce vzniknou další kvarky či gluony, QCD

umožňuje předpovědět jak se změní úhel mezi dvojicí partonů (a tedy i jetů) s největší příčnou hybností. Tuto závislost jsme studovali na nových souborech dat [7] (viz. obr. 9) a



Obrázek 9: Naměřené rozdělení azimutálního úhlu mezi dvojicí jetů s největší energií.

zjistili jsme, že tato data jsou ve velmi dobrém souhlase s předpovědí QCD, jsou-li zahrnuty první dva členy poruchové teorie. Obr. 9 také ukazuje na důležitost započtení druhého řádu (NLO), bez něhož by teorie (LO) nebyla schopna data správně popsat.

Experiment DØ zaznamenal do dnešního dne na magnetické pásky více než miliardu případů srážek, což představuje téměř 1PB (10^{15} byte) dat. Rekonstrukce dat se provádí přímo ve Fermilab, zatímco simulace detektoru v počítačových centrech mimo Fermilab. Tyto simulace jsme ve FZÚ zahájili s 5 počítači na konci roku 1999. Od roku 2001 jsme pro simulace začali využívat počítačové farmy sdružení CESNET. Etablovali jsme se tak jako jedno z šesti výpočetních center experimentu. Od té doby se počítačový výkon pro potřeby DØ experimentu neustále zvyšuje. V roce 2003 zakoupil FZÚ novou počítačovou farmu pro účely všech experimentů v částicové fyzice, z toho pro potřeby DØ využíváme kolem stovky procesorů.

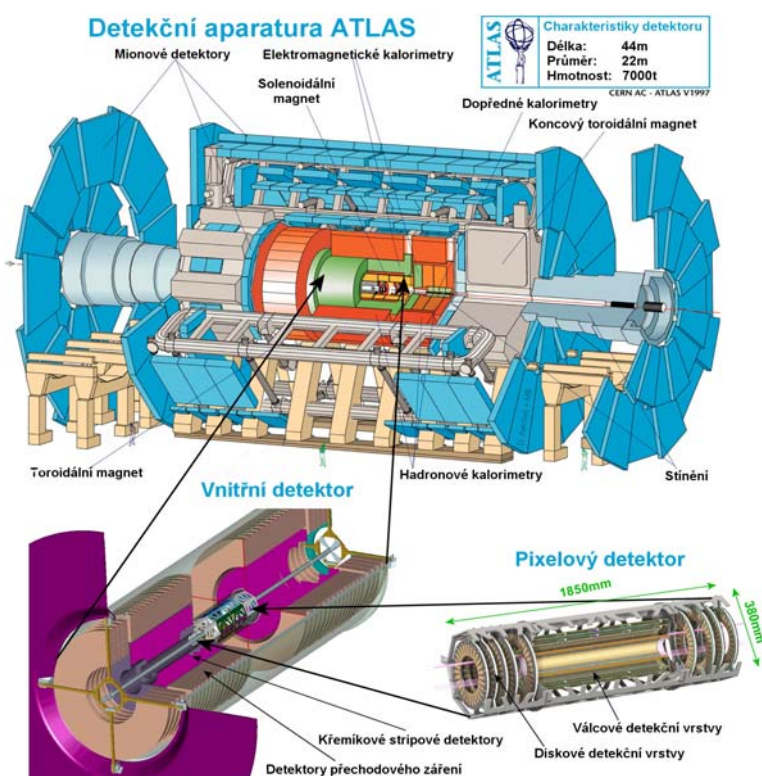
V současné době jsme zahájili na naší počítačové farmě plnou rekonstrukci dat, jež probíhá v úzké spolupráci s MFF UK

Tým FZÚ tvoří 4 vědečtí pracovníci, M. Lokajíček, V. Vrba, A. Kupčo a V. Šimák, a je do něj zapojeno několik doktorandů z ČVUT a MFF UK.

Experiment ATLAS na urychlovači LHC v CERN

je svou důležitostí a rozsahem největším projektem fyziky částic v ČR. FZÚ se ve spolupráci s kolegy z MFF UK a FJFI ČVUT od samého počátku projektu podílel na stavbě různých částí detektoru, jejich sestavování a uvádění do provozu. Nástin fyzikálního programu, jenž bude s jeho pomocí od konce roku 2007 uskutečňován, nalezne čtenář v článku [1]. Zde se zaměříme na vylíčení pokroku při realizaci tohoto projektu v uplynulých zhruba pěti letech.

Detektor ATLAS, jehož schéma je zachyceno na obr. 1, má tvar ležícího válce o délce 44 m, průměru 22 m a váze 7 tis. tun. Protony o energiích 7000 GeV se sráží uprostřed detektoru a produkty srážek se rozletají na všechny strany. Nejdříve procházejí vnitřním detektorem, umístěným v poli supravodivého magnetu o indukci 2T, který zakřivuje dráhy nabitých částic



Obr. 10: Schéma detektoru ATLAS s umístěním centrálního dráhového detektoru.

a umožňuje tak změřit jejich hybnost. Poté částice vstupují do kalorimetru, který měří energii elektromagnetické a hadronové složky. Na obvodě detektoru jsou umístěny mionové komory s osmi supravodivými toroidálními magnety o délce 26 m s polem 2 T, které měří dráhy mionů po průchodu hadronovým kalorimetrem. Ke srážkám dochází každých 25 nanosekund, tj. s frekvencí 40 MHz, a elektronický systém vybírá zvolené zajímavé případy, jež se zapisují na vnější magnetická média s frekvencí 100 Hz. Při objemu dat 1.6 MB na typický případ je očekáván celkový tok dat 160 MB/s. Celkově bude experiment ATLAS produkovat ročně asi 7 PB dat. Pro přístup k takovému množství dat a jeho zpracování se vyvíjejí systémy distribuovaného počítání – gridy – a spe-

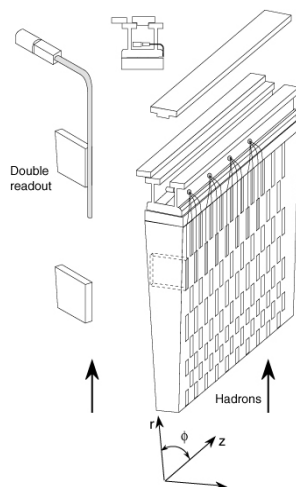
cielně tzv. LCG (LHC Computing Grid), o nichž bude ještě dále řeč.

Pracovníci FZÚ se podílejí na vývoji, testování a stavbě dvou subdetektorů – **hadronového kalorimetru TILECAL** a **vnitřního dráhového detektoru**, konkrétně dvou jeho komponent: **pixelového** a **stripového** detektoru. Jsou zapojeni také do vývoje softwaru pro spouštění (triggerování) detektoru, vývoje výpočetních a komunikačních prostředků a do přípravy fyzikálního programu experimentu.

Hadronový kalorimetr TILECAL [8] je určen k měření energie a směru jetů částic. Je umístěn za elektromagnetickým kalorimetrem, který pohltí elektrony, positrony a fotony a změří jejich energii. Mezony a baryony po průchodu elektromagnetickým kalorimetrem, v němž ztratí jen malou část své energie, vstoupí do hadronového kalorimetru, kde se sráží s jádry jeho pasivního materiálu – oceli a v následných srážkách – hadronových sprškách – postupně ztrácejí energii až do úplného pohlcení. Miony při průchodu hadronovým kalorimetrem ztratí jen část své energie (která je též změřena) a jejich hybnost je změřena následujícím mionovým detektorem v magnetickém poli.

TILECAL se skládá ze tří ležících válců se společnou osou tvořenou svazky urychlovače, (obr. 10). Vnější průměr válců je 8 m, prostřední válec má délku 6 m, postranní válce 3m.

Celý kalorimetr váží 3 000 t. Každý váleček je tvořen 64 moduly (viz obr. 11), modul prostředního válečku váží 22 tun a modul krajních válečků polovinu. V detektoru je umístěno 256 elektronických bloků, každý se 45 fotonásobičů, elektronikou pro napájení fotonásobičů vysokým napětím, elektronikou pro sběr dat, úpravu a odesílání signálů. Elektronika je napájena lokálním zdrojem nízkého napětí. Pasivní materiál je tvořen vrstvami oceli o tloušťkách 4 a 5 mm.



Obr. 11: Schéma modulu TILECAL.



Obr. 12: Výroba 309 částí TILECAL ve FZÚ. Vzadu poloautomatické zařízení na dávkování a nanášení lepidla. V popředí ocelový stůl, na němž je část sestavována.

Aktivní materiál tvoří 3 mm tlusté kachlíky (anglicky *tiles*) scintilátoru, po kterých je detektor též pojmenován. Částice z hadronové spršky způsobí světelné záblesky ve scintilátoru, jejichž celková intenzita je úměrná energii pohlcené částice či jetu. Světlo ze scintilačních kachlíků je odvedeno optickými vlákny s posunovači vlnové délky do fotonásobičů, kde je převedeno na elektrický impuls, který je upraven, zesílen, digitalizován a odeslán do systému sběru dat.

Ocelová struktura detektoru byla stavěna v 8 laboratořích po celém světě. V Praze byla v letech 1998-2001 postavena jedna čtvrtina prostředního válečku detektoru. Celkem bylo ve FZÚ ve spolupráci s MFF UK vyrobeno 309 stejných částí struktur z válcované oceli, každý o váze téměř 1 tuna (obr. 12). Válcovaná ocel pro výrobu celého hadronového kalorimetru byla dodána z ČR a pracovníci FZÚ a MFF UK byli zodpovědní za kontrolu kvality oceli.



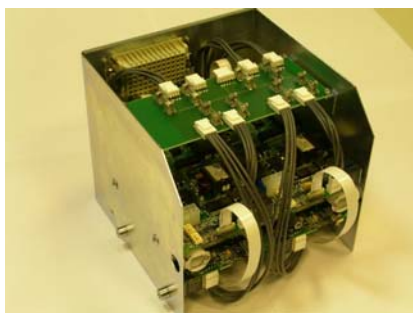
Obr. 13: Vysokonapěťový zdroj se 16 kanály vyvinutý ve FZÚ.

FZÚ ve spolupráci se společností TESLA, a.s. v Praze vyvinul také systém zdrojů vysokého napětí pro napájení 10 000 fotonásobičů TILECAL. Systém se skládá z 16 skříní zdrojů, každá s 16 kanály, každý kanál dodává napětí ve dvou hladinách 830 a 950V a proud 20 mA. Jedním kanálem zdroje je napájeno 45 fotonásobičů. Zdroje (obr. 13) vyrobila společnost TESLA, a.s. v letech 1999-2001. FZÚ zajistil komplexní testování všech zdrojů včetně dlouhodobých testů stability a testů se skutečnou zátěží v CERN.



Obr. 14: Jedna z 22 jednotek tří-kanálových zdrojů stejnosměrného napětí 200 V.

V roce 2004 začala ve FZÚ výroba a testování části systému zdrojů nízkého napětí pro 256 elektronických bloků umístěných v detektoru TILECAL. Systém se skládá ze zdrojů stejnosměrného napětí 200 V (obr. 14) jako primárního zdroje, měničů napětí a sady pomocných zdrojů pro

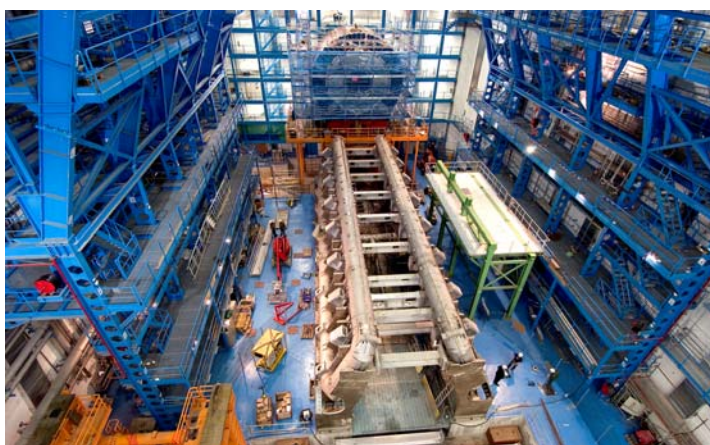


Obr. 15: Jeden z měničů převádějících 200 V na 8 hladin. Krychle o hraně 17 cm a příkonu 250 W chlazená vodou, je radiačně odolná a pracuje v magnetickém poli 200 Gauss

napájení řídicí elektroniky. Radiačně a magneticky odolné měniče ve tvaru krychle obsahují osm konvertorových modulů, řídicí a pojistkovou desku a jsou chlazené vodou (obr. 15). Celý zdrojový systém včetně měničů napětí byl vyvinut ve FZÚ a výroba řady jeho komponent nyní probíhá v podnicích ČR. Na výrobě některých částí systému, zejména kabeláže a transformátorů pro měničové moduly se podílejí také naši technici. Ve FZÚ se nyní buduje jedno ze dvou pracovišť pro testování a finální montáž osmihladinových měničů. Testování jednotlivých komponent a finální montáž jsou zodpovědností pražské skupiny. Dodávka první části systému je plánována na druhou polovinu 2005 a celý systém v roce 2006.

V letech 2001-5 bylo ve FZÚ dále vyrobeno 18 tis. speciálních kabelů pro spouštění aparatury ATLAS. Paralelně

s výrobou součástí detektoru jsme se účastnili na instrumentaci TILECAL v CERN, testování modulů na svazcích částic a sestavování celého kalorimetru v podzemní hale. V roce 2004 byla část středního válce spuštěna do podzemní haly a válec sestaven na dočasném místě (obr. 16). Koncem roku 2005 bude přesunut do finální polohy a v roce 2006 budou instalovány i postranní válce. Postupně bude kalorimetr uváděn do provozu a testován pomocí mionů z kosmického záření.



Obr. 16: Pohled do podzemní haly ATLAS. V pozadí detektor TILECAL v dočasné poloze.

Vnitřní detektor je umístěn v centru celé aparatury (viz obr. 10) v bezprostřední blízkosti místa, kde dochází ke srážkám částic. Jeho pixelová část je tvořena více než sto miliony miniaturních detekčních buněk – pixelů, o rozměrech 50x400 mikronů, vytvořených na křemíkovém substrátu. Toto zařízení umožňuje přesně měřit parametry krátce žijících částic (s dobou života typicky 1 ps). Na vývoji pixelových detektorů se podílíme od r. 1993. Zaměřili jsme se



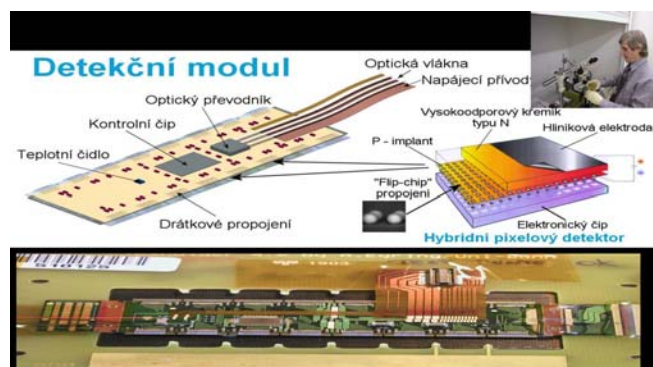
Obr. 17: Pixelové senzory vyrobené v TESLA Seznam, Rožnov p. Radhoštěm.

na vývoj radiačně odolné varianty pixelových senzorů a na stanovení jejich detekčních a provozních charakteristik. Významně jsme přispěli k tomu, že polovina pixelových senzorů ATLAS (viz obr. 17) byla vyrobena v ON Semiconductor (dříve TESLA Seznam), Rožnov p. Radhoštěm. Spolu s *Univerzitou Dortmund*, *INFN Udine* a *Univerzitou New Mexico* jsme odpovědní za testování čtvrtiny celkové produkce.

Ve FZÚ probíhá testování senzorů pro vrstvu, jež umožní měření rozpadů částic obsahující kvark b. Vedle toho se účastníme prací v montážních centrech kolaborace v Dortmundu (obr. 18) a Bonnu na montáži a testování modulů a v Marseille na testování detekčních lišt.

K měření drah nabitých částic jsou určeny *křemíkové stripové detektory*, které jsou umístěny bezprostředně za pixelovými detektory. Pracují na podobném principu, jako pixelové detekto-

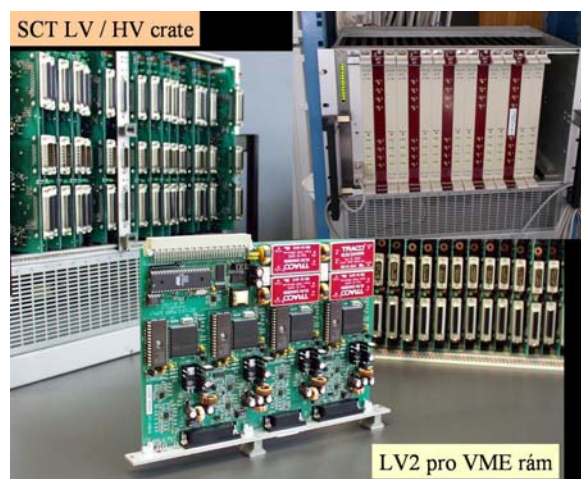
ry, avšak mají podstatně jinou granularitu detekčních elementů – jsou ve tvaru proužku o délce 6cm a šířce přibližně jedna desetina milimetru.



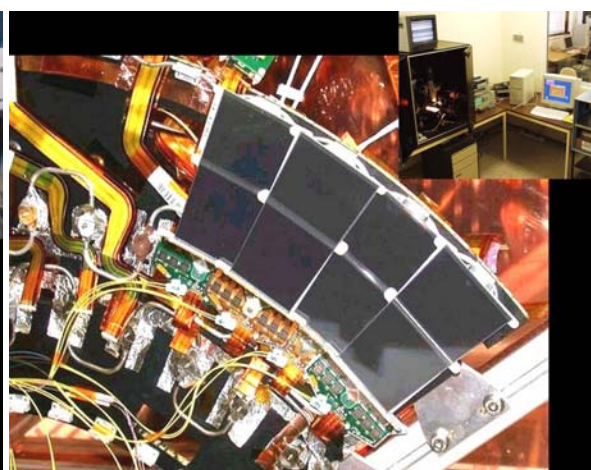
Obr. 18: Montáž detekčních modulů

Stavbě SCT ATLAS se vedle naší skupiny věnují i pracovní skupiny na MFF UK a na pracovištích ČVUT. Naše skupina je pracovně napojena na ženevskou skupinu, v níž jsou kromě CERN i university v Ženevě, Krakově a Lublani. Ve FZÚ bylo testováno 2575 senzorů od firmy Hamamatsu (obr. 20). Skupina je rovněž odpovědná za vývoj, výrobu a instalaci speciálních nízkonapěťových napájecích zdrojů (obr. 19) pro čtecí elektroniku stripových senzorů SCT. V r. 2003 byl vývoj ukončen, proběhly úspěšně systé-

mové testy a byla schválena ověřovací výroba 10% těchto zdrojů, která byla zadána české firmě TTC Telekomunikace.



Obr. 19 Vývoj LV zdrojů pro SCT



Obr. 20: Testování stripových detektorů.

Hlavním cílem experimentu ATLAS je hledání odpovědi na základní otevřené otázky týkající se zákonitostí mikrosvěta, tak jak jsou nastíněny v [1]. Po spuštění aparatury ATLAS se proto hlavní úsilí našich pracovníků soustředí na analýzu experimentálních dat a jejich fyzikální interpretaci. Abychom byli připraveni účinně se na této činnosti podílet, jsou členové pražské skupiny již několik let zapojeni do několika pracovních týmů experimentu ATLAS zabývajících se různými aspekty procesů, které budou ve srážkách protonů s protony na urychlovači LHC probíhat. Objevit nové částice či pozorovat nové jevy ovšem předpokládá dobře rozumět jevům známým, tak jak jsou shrnuty ve standardním modelu a také co nejúplněji zohlednit vliv, který bude detektor ATLAS na průběh srážek mít. Detailní znalost dráhových detektorů a kalorimetrů, na jejichž vývoji a konstrukci se podílíme, je z tohoto hlediska velmi užitečná. V návaznosti na dosavadní činnost se věnujeme následujícím tematickým okruhům:

- **Fyzika top kvarku.** Tento nejtěžší kvark hraje klíčovou roli při hledání nových jevů jdoucích za standardní model. My se zaměřujeme na otázku měřitelnosti spinových korelací jeho rozpadových produktů.
- **Standardní model.** Většina jevů standardního modelu bude hrát roli pozadí při hledání jevů nových a je proto důležité jim dokonale porozumět. My jsme se zatím zapojili do problematiky měřitelnosti Drell-Yanovy produkce intermediálního vektorového bosonu Z.

- **Fyzika jetů.** Zkoumání produkce jetů na LHC je mimořádně důležité, neboť většina projevů „nové fyziky“ bude vyjádřena právě jako výpověď o produkovaných jetech. Konkrétně se zabýváme zkoumáním projevů případné substruktury kvarků a tzv. difrakčními procesy.

Fyzikální analýza uvedených procesů vyžaduje celou řadu programů, jejichž vývoj, instalace a neustálé zdokonalování, stejně jako instalace velkých programových systémů *ATLAS software*, je součástí činnosti skupiny.

Tým FZÚ se skládá ze 11 fyziků (J. Böhlm, J. Chudoba, M. Lokajíček, J. Mašík, S. Němeček, J. Rameš, P. Staroba, V. Šimák, V. Vrba a od jara 2005 i A. Kupčo a M. Taševský), 4 doktorandů (M. Bazalová, V. Juránek, L. Příbyl, J. Valenta) a 8 inženýrů (I. Hruška, B. Palán, J. Popule, P. Šícho, J. Štastný, L. Tomášek, M. Tomášek, K. Zítek).

Observatoř Pierra Augera

Cílem mezinárodního projektu Observatoř Pierra Augera je studium kosmického záření s extrémně vysokými energiemi. Jedná se o částice neznámého původu, jejichž energie přesahuje hodnotu 10^{18} eV. Prozatím nejvyšší energie částice kosmického záření byla zaznamenána v roce 1991 a měla hodnotu $3,2 \cdot 10^{20}$ eV. Pro srovnání připomeňme, že na urychlovači LHC v CERN budou protony urychlovány na energii 7 TeV, tedy $7 \cdot 10^{12}$ eV, ale vzhledem k tomu, že tam půjde o čelné srážky dvou protiběžných svazků, bude jejich srážková energie ekvivalentní energii srážky protonů kosmického záření s energiemi 10^{17} eV s jádry kyslíku a dusíku v atmosféře.

Velkým problémem při pozorování vysoce energetických částic kosmického záření je jejich velmi malá četnost. Částic s energií 10^9 eV dopadá na Zemi zhruba 10 tisíc na čtvereční metr za sekundu, ale s rostoucí energií jejich počet rychle klesá a na čtvereční kilometr dopadne za rok jen jediná částice s energií 10^{19} eV. Během posledních čtyř desetiletí byly pozorovány všemi experimenty pouhé dvě desítky částic s energiemi nad 10^{20} eV.

Přítom právě existence takovýchto částic je velkou záhadou. Podle dnešních představ musejí částice s energií vyšší než $6 \cdot 10^{19}$ eV přicházet ze zdrojů vzdálených méně než 100 megaparseků, protože jinak by díky interakci s fotony reliktního záření ztratily značnou část své energie. Konkrétní výpočty tohoto efektu ukazují, že ve spektru kosmického záření bychom měli pozorovat výrazný pokles počtu částic pro energie vyšší než $6 \cdot 10^{19}$ eV, nazvaný podle svých objevitelů Greisenova-Zatsepinova-Kuzminova (GZK) mez. Dosavadní experimenty však existenci této GZK meze nepotvrdily.

Vysvětlením původu tak energetických částic by mohly být galaktické zdroje (např. mladé pulsary s velmi silnými magnetickými poli), ale pak by pozorované přiletly nemohly být rozmístěné rovnoměrně na obloze, nýbrž by se musely koncentrovat v rovině Galaktického disku. Jedině pokud jsou primární částice těžká atomová jádra (např. jádra železa), mohou být jejich trajektorie zakřivené v magnetickém poli Galaxie tak, že směry přiletu mohou být rozptýlené po celé obloze. Otázkou je, zda-li magnetické pole naší Galaxie je dost silné na to, aby dokázalo tyto částice uvěznit a následně rozptýlit.

Ohyb částic kosmického záření závisí kromě intenzity magnetického pole také na energii částic. Zdroje kosmického záření se proto identifikují tak, že se hledají shluky částic s blízkými energiemi přicházející ze směrů v úhlové vzdálenosti menší než několik stupňů. Za předpokladu, že všechny tyto částice přicházejí z jednoho zdroje, lze jeho místo určit ze srovnání dat s počítačovými simulacemi šíření částic v Galaktickém a extragalaktickém magnetickém poli.

Vzhledem k obtížnosti urychlení částic na vysoké energie známe jen nevelký počet možných zdrojů. Jedná se o velké rozlehlé objekty, například celé galaxie či ohromná oblaka mezigalaktického plynu, v nichž dochází k urychlování částic v důsledku opakovaných srážek s pohybujícími se oblaky kosmického plazmatu. Dalšími možnými zdroji by pak mohly být vesmírné objekty, ve kterých dochází k dramatickým jevům (zbytky po výbuchu supernov, akreční disky okolo černých děr a aktivní galaktická jádra). Sem patří i procesy způsobující záblesky záření gama, které vznikají právě interakcí ultrarelativisticky urychlených částic s okolním prostředím. Pokud však mají částice urychlené ve zdrojích ležících ve velkých kosmologických vzdálenostech dorazit na Zemi, musely by být tyto zdroje vysoce efektivní a produkovat velké množství částic.

Zdrojem vysoce energetických částic by mohly být také dosud nepozorované supertěžké částice, které mohly vznikat při srážkách různých hypotetických objektů existujících v raných fázích vesmíru, jako jsou kosmické struny, doménové stěny, magnetické monopóly a podobně. Tyto supertěžké částice by měly mít energie kolem 10^{24} eV, vyskytovaly by se v nevelkých vzdálenostech a jejich rozpadem by měly vznikat typicky desetitisíce baryonů a mezonů

s potřebnými energiemi (tedy nad 10^{20} eV), které mohou dopadnout až na Zemi. Při těchto procesech mohou vznikat i fotony a neutrina s podobně velkými energiemi.



Obr.21: Každá stanice povrchového detektoru je pojmenována, aby je mohli vědci a technici rozlišit. V roce 2004 zorganizoval Český rozhlas a Fyzikální ústav AV ČR soutěž pro děti, v níž mohly navrhnout právě několik jmen stanic povrchového detektoru. Celkem bylo takto pojmenováno patnáct sudů, které byly rozmístěny v argentinské pampě. Na obrázku je jeden z několika stovek již fungujících detektorů. Každý sud pracuje automaticky dnem i nocí, potřebnou energii čerpá ze slunečních panelů a přenos informací se děje komunikační anténou.

průletu relativistické částice vodou.

Naproti tomu optické teleskopy vybavené citlivými fotonásobiči pozorují krátké záblesky fluorescenčního záření na hranici optického a UV spektra (interval vlnových délek 300 až 400 nm). Fluorescenční záření je vyzařováno molekulami atmosférického dusíku po excitaci



Obr 22: Fotometrický Robotický Atmosférický Monitor (FRAM) se skládá z dalekohledu s fotometrem a dvěma CCD kamerami. Fotometr je umístěn v primárním ohnisku dalekohledu typu Cassegrain s průměrem 200 mm a ohniskovou vzdáleností 2970 mm

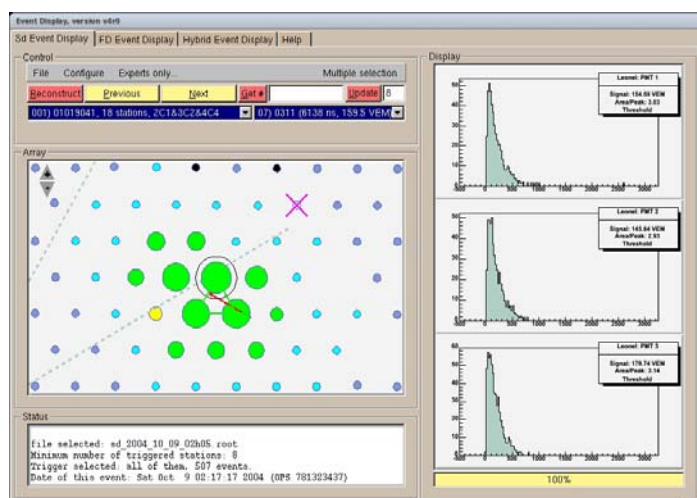
Detektor AUGER [9] budovaný v provincii Mendoza v Argentině si klade za cíl vyřešit původ těchto “záhadných” částic. Vysoce energetické částice kosmického záření již není možné pozorovat přímo (pomocí satelitů nebo detektory vnesenými balóny), ale pozorováním atmosférických spršek. Atmosférická sprška vzniká srážkou primární částice po jejím průniku do zemské atmosféry a následnými mnohočetnými srážkami vznikajících částic s jádry dusíku a kyslíku. Srážkami vznikají další a další částice, reakce se rozvíjí a výsledkem je sprška sekundárního kosmického záření, která dopadá na zemský povrch. Spršku lze pozorovat buď pomocí pozemních detektorů nebo pomocí tzv. fluorescenčních teleskopů. V projektu AUGER jsou poprvé využívány oba způsoby detekce. Pozemní síť se skládá z 1600 povrchových detektorů (vodní nádrže s třemi fotonásobiči na obr. 21) umístěných v pravidelných vzdálenostech 1,5 km v hexagonální síti. Průlet sekundárních částic se v nich zaznamenává pomocí Čerenkovova záření vzniklého při

sekundárními částicemi spršky a v závislosti na energii spršky je lze zaznamenat i na vzdálenost desítek kilometrů. Studium závislosti produkce fluorescenčního záření na atmosférických podmínkách v oblasti průletu spršky je základním faktorem pro určení energie primární částice. Laboratorně tuto závislost zkoumáme v experimentu AIRFLY [10] ve Frascati, v němž světlotěsnou komůrku naplněnou plynem o požadovaných vlastnostech ozařujeme svazkem relativistických elektronů z lineárního urychlovače. Intenzita svazku se monitoruje scintilátory, jako detektory světla se používají fotonásobiče nebo hybridní fotodiody.

Rekonstrukcí pozorovaných vlastností dané spršky je možné získat informace o energii primární částice, směru příletu a jejím typu (jedná se buď o protony případně jiná atomová jádra nebo také neutrina či fotony). Vlastnosti spršky závisejí jak na vlastnostech primární částice, tak na daném stavu atmosféry (oblačnost, vlhkost apod.). Pro

správné určení energie spršky, zaznamenané fluorescenčním detektorem, je nezbytná co nejpřesnější znalost okamžitých vlastností atmosféry. V rámci projektu AUGER je monitorování atmosféry věnována značná pozornost. Konečným cílem je využití údajů z atmosférické databáze pro přesnou rekonstrukci jednotlivých spršek. Ke komplexnímu studiu změn parametrů atmosféry slouží v Augeru několik zařízení, mezi nimi i FRAM - Fotometrický Robotický Atmosférický Monitor (obr. 22), zkonstruovaný pracovníky FZÚ. FRAM provádí fotometrii standardních hvězd a kalibrovaných umělých pozemních zdrojů v několika různých vlnových délkách. Tato měření pak slouží k určení okamžité atmosférické extinkce (rozptylu fluorescenčního světla na cestě od spršky k detektoru) a k určení její závislosti na vlnové délce.

Observatoř Pierra Augera v Argentině by měla být v plném provozu v roce 2006, nicméně již déle než rok úspěšně nabírá data (příklad jedné takové spršky je na obr. 23). První výsledky budou prezentovány na nadcházející celosvětové konferenci o kosmickém záření v Indii. Pro tuto konferenci připravujeme příspěvky týkající se studia chování fluorescenčního detektoru a



Obr.23: Typická atmosférická sprška vyvolaná primární částicí s energií nad 10^{19} eV zasáhne několik pozemních detektorů. Na obrázku jsou sudy, které zachytily signál příslušející sekundárním částicím atmosférické spršky, vyznačeny zelenou barvou a velikost koleček odpovídá úrovni detekovaného signálu (sud s největším signálem, viz pravá část obrázku, se nachází nejbližše středu spršky). Naopak sudy znázorněné světle modrou barvou nezaregistrovaly žádnou prolétávající částici.

gluonového plazmatu ve vysokoenergetických interakcích jader a jaký bude mít vliv na charakteristiky vznikající atmosférické spršky.

Během několika dalších let lze očekávat odpověď na otázku existence a složení kosmického záření nejvyšších energií, jež se v současnosti řadí k největším záhadám astrofyziky a částicové fyziky. Podrobnější informace o projektu AUGER a aktuální činnosti české skupiny mohou být nalezeny na jejich internetových stránkách [15].

Pracovní tým tvoří ze Sekce fyziky elementárních částic 2 fyzikové (J. Grygar a P. Trávníček) a 3 doktorandi (M. Boháčová, M. Prouza a R. Šmída), do projektu jsou dále zapojeni pracovníci Sekce Optiky.

rekonstrukce spršek z tohoto zařízení. V poslední době byla vyvinuta metoda, jak z detekovaných trajektorií hvězd na kameře fotonásobičů přesně studovat orientaci fluorescenčních teleskopů. To pomůže zvýšit přesnost určení směrů příletů spršek. Kvalitu rekonstrukce studujeme pomocí analýzy výstřelů ze vzdáleného laserového zařízení. Porovnáme nominální a rekonstruované parametry této laserové „spršky“. Členové skupiny se také zabývají studiem vlivu galaktického magnetického pole na odchylování drah nabitých primárních částic z jejich původního směru a to zejména v souvislosti se studiem možné anisotropie detekovaného kosmického záření. Dále se věnujeme Monte Carlo simulacím průchodu spršek atmosférou, speciálně zahrnutí nových efektů do těchto simulačních nástrojů. Jednou z řešených otázek je, jak se projeví případný vznik kvark-

Teorie

Rozvoj metod poruchové kvantové chromodynamiky

Fyzikální veličiny popisující jevy, za něž jsou zodpovědné silné interakce mezi kvarky a leptony na malých vzdálenostech lze v rámci kvantové chromodynamiky (QCD) popisovat pomocí poruchových řad. V těchto řadách je rozvojovým parametrem efektivní barevný náboj α_s , jenž představuje analog efektivního elektrického náboje v kvantové elektrodynamice, či přesněji řečeno konstanty jemné struktury α . Charakteristickým rysem obou teorií je skutečnost, že tyto řady, chápány jako mocninné řady v α , resp α_s , jsou divergentní. V kvantové elektrodynamice, kde je parametr rozvoje $\alpha=1/137$ velmi malý, se divergence poruchových řad v několika prvních členech, které jsou v praxi spočitatelné, neprojeví. V QCD je situace jiná, neboť rozvojový parametr α_s (jenž v QCD není konstantou) se pohybuje v intervalu (0.1-0.3) a divergence řad se proto projeví již v mnohem nižších řádech. Tato skutečnost vyvolává potřebu nějakým způsobem divergentní řady v QCD „sečíst“. „Sčítat“ divergentní řady je však problém, jenž z hlediska matematiky nemá jednoznačné řešení a jde vždy v jistém smyslu o definici „součtu“.

J. Fischer ve spolupráci s I. Caprini z Bukurešti vypracoval modifikaci standardní poruchové řady [12], jež uchovává její přednosti a problém divergence standardních poruchových řad určitým způsobem řeší. Podstatou metody je nahrazení rozvoju v mocninách α_s rozvojem ve speciálně definovaných funkcích $W_n(\alpha_s)$, které již obsahují známé chování koeficientů poruchových řad pro velké řady. Výhody této metody byly demonstrovány na případě doby života leptonu τ [13]. Metoda samu a její použití bude dále rozvíjena.

Spinová struktura protonu

Většina informací o vnitřní struktuře protonu a neutronu pochází z analýzy jejich tvrdých srážek s leptony (elektrony, miony či mionovými neutryny a jejich antičásticemi), v nichž jsou obě srážející se částice nepolarizované, tj. je vystředováno přes jejich spiny. Z těchto (a dalších) dat byly extrahovány distribuční funkce kvarků i gluonů v protonu jako funkce frakce x hybnosti protonu, které nesou, ale bez ohledu na orientaci jejich spinu vůči orientaci spinu protonu. Současná teorie není schopná distribuční funkce kvarků a gluonů spočítat, ale z úvah v rámci kvantové chromodynamiky plyne, že pro pochopení jejich tvarů nehraje jejich vnitřní pohyb uvnitř protonu, vyvolaný skutečností, že proton má konečný rozměr, významnou roli. Z experimentálních dat také plyne, že zhruba polovinu hybnosti protonu nesou gluony. Ani to nepřekvapuje, neboť gluony s kvarky interagují silně.

V posledních zhruba 15 letech je stále větší pozornost, experimentální i teoretická, věnována zkoumání srážek polarizovaných leptonů na polarizovaných nukleonech, neboť ty v sobě skrývají informaci o distribučních funkcích kvarků s danou orientací spinu (polarizovaných kvarků). Analýza dosavadních experimentálních dat svědčí o tom, že jen asi čtvrtina spinu nukleonu je tvořena spiny kvarků a antikvarků a že příspěvek gluonů k celkovému spinu protonu, jenž je znám s velkou nejistotou, nebude zřejmě stačit k vysvětlení co nese zbylé tři čtvrtiny.

Na rozdíl od vlivu na tvar distribučních funkcí může pohyb kvarků uvnitř protonu významně ovlivnit spin nukleonu, neboť generuje orbitální moment hybnosti, jenž v standardní přístupu k popisu tvrdých srážek v rámci QCD uvažován není. Převládá názor, že právě započtení příspěvku orbitálního momentu hybnosti kvarků v protonu povede k definitivnímu odpovědi na otázku, co nese spin protonu.

P. Závada formuloval a rozpracoval konkrétní model vnitřního pohybu kvarků a antikvarků v protonu a neutronu [14], v jehož rámci se mu po započtení orbitálního momentu hybnosti podařilo dosáhnout dobrého souhlasu s experimentálními daty z tvrdých srážek polarizovaných leptonů s polarizovanými protony. Na dalším rozpracování svého modelu spolupracuje s ruskými fyziky [15].

Nový typ baryonů a mezonů?

Jak jsme se již zmínili v části o experimentu H1, během posledních 3 let byly v několika experimentech pozorovány částice – baryony – jež jsou podle současných představ složeny ze čtyř kvarků a jednoho antikvarku. Tyto tzv. pentakvarky jsou předmětem intenzivního zájmu experimentátorů i teoretiků, neboť poskytují důležitou informaci o charakteru sil působících mezi kvarky a antikvarky v mnohokvarkových systémech a na velkých vzdálenostech. Touto problematikou se zabývá M. Bednář.

K čemu všemu je pružný rozptyl

Problematikou teoretického popisu pružných srážek protonů se dlouhodobě zabývají M. Lokajíček st. a V. Kunderát [16]. Při rozptylu na malé úhly, které v tomto procesu dominují, dochází k interferenci amplitud silných a elektromagnetických interakcí. To umožňuje určit některé dynamické veličiny, které silné interakce charakterizují. Naši pracovníci vypracovali metodu, která umožňuje tyto veličiny určit s velkou přesností. Z experimentálních dat s její pomocí stanovili parametr charakterizující geometrii pružných srážek nukleonů [17].

Přesné měření pružného rozptylu na malé úhly je zajímavé samo o sobě, ale bude také přímo klíčové pro stanovení luminosity urychlovače LHC v CERN. Co nejpřesnější znalost luminosity LHC bude nezbytným předpokladem při hledání projevu „nové“ fyziky. M. Lokajíček st. a V. Kunderát se spolu s doktorandem J. Smotlachou a jedním diplomantem přímo zapojili do experimentu TOTEM na LHC. Jejich příspěvek se v současné době týká především budování detektoru samotného. V první fázi se experiment TOTEM zaměří na přesné měření účinného průřezu pružného rozptylu. A v druhé fázi pak na studium difrakčních procesů, při nichž dochází k produkci dalších částic a jimž je v poslední době věnována velká pozornost.

Experiment TOTEM je v porovnání s jinými experimenty na LHC malý a levný. Pro přesné měření hybnosti protonu rozptýleného na velmi malé úhly se používají speciální detektory, tzv. „římské hrnce“, jež jsou umístěny blízko svazků urychlovače, ale daleko (stovky metrů) od bodu srážek protonů s protony. Výroba těchto detektorů vyžaduje mimořádnou přesnost. Na jejich vývoji a stavbě se podílejí pracovníci firmy Vakuum Praha, s.r.o.

Fermiony zdrojem mnohotvárnosti vesmíru

Diracova relativistická rovnice správně popisuje pohyb a vlastnosti elektronu ve vnějším elektromagnetickém poli generovaném bodovým elektrickým nábojem (Coulombově poli). Zobecnění těchto výsledků na případ nabitých fermionů s vyšším spinem (např. $3/2$) je ovšem velice obtížné, neboť příslušné rovnice mají některé nefyzikální vlastnosti. J. Niederle ve spolupráci s A. Nikitinem z Kijeva navrhli [18] nové relativistické rovnice vhodné k popisu fermionů s libovolným spinem s , které tyto nedostatky nemají. Nové rovnice jsou kauzální, dovolují zavést interakci s vnějším elektromagnetickým polem a existují pro ně i dobře definovaná kvazirelativistická přiblížení. V práci [19] její autoři tyto rovnice využily k odvození energie vázaných stavů nabitých fermionů s libovolným spinem nacházejících se v Coulombově poli. Své výsledky hodlají srovnat s experimentálními daty, například se spektrem energií vázaných stavů částice Ω^- (jež má spin $3/2$) v exotických atomech, které mají jádro tvořené olovem ^{208}Pb a kde Ω^- nahrazuje jeden z elektronů.

Dál za standardní model

Ačkoliv předpovědi standardního modelu dobře souhlasí s experimentem, má tento model daleko k dokonalosti a úplnosti. Základní otevřené otázky SM jsou nastíněny v [1]. Jedna cesta k jejich zodpovězení vychází z myšlenky, že elementární částice nejsou bodové, nýbrž vícerozměrné objekty (struny, membrány či obecně p-brány). Jiná myšlenka spočívá v tom, že náš prostoročas je více než čtyřrozměrný. V modelech vycházejících z těchto hypotéz se obvykle navíc předpokládá, že v přírodě platí tzv. supersymetrie – symetrie, která propojuje svět fermionů (částic s poločíselným spinem) a bosonů (částic s celočíselným spinem) a způsobu-

je, že ke každé částici dnešního SM by v přírodě měla existovat částice, tzv. supersymetrický partner, se spinem lišícím se o $\frac{1}{2}$. Tyto částice však dosud nebyly nalezeny.

Samotná myšlenka supersymetrie se ovšem ukazuje být užitečná i v rámci nerelativistické kvantové mechaniky, kde pomáhá při hledání řešení pohybových rovnic. Tímto směrem využití supersymetrie se zabývá J. Niederle.

Kolik rozměrů má náš prostoročas?

Standardní model vychází z empirické zkušenosti, že námi vnímaný prostoročas má 3 prostorové a jednu časovou dimenzi. Teorie strun naproti tomu z důvodů vnitřní konsistence přidávají k obvyklým 3 ještě dalších 6 prostorových dimenzí. V původních strunových teoriích byly tyto tzv. „extra“ dimenze nesmírně malé, řádově velikosti Planckovy délky (tj. 10^{-33} cm), a jejich projevy tedy experimentálně nepozorovatelné.

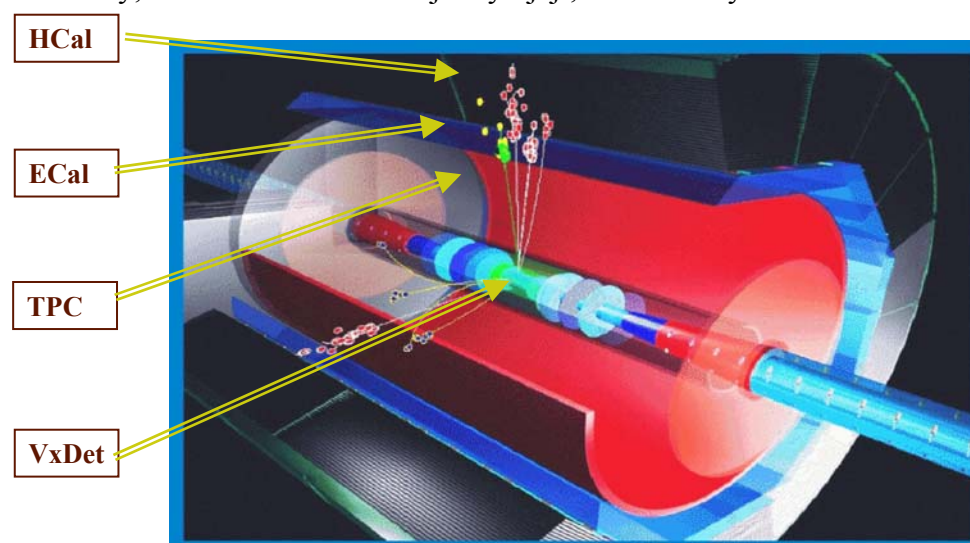
V poslední době se však objevily teorie, v nichž velikost extra dimenzí mohou být daleko větší, řádově 10^{-12} cm až zlomky milimetru. V závislosti na počtu extra dimenzí (2 až 6) by proto jejich projevy mohly být pozorovatelné již na urychlovačích Tevatron ve Fermilab a LHC v CERN. V nejjednodušších variantách těchto teorií je náš vesmír lokalizován na $3+1$ rozměrném podprostoru $(3+1+N)$ -rozměrného prostoročasu, přičemž počet N extra dimenzí je 2 až 6. Klíčovou součástí těchto teorií je předpoklad, že zatímco silné a elektroslabé interakce „cítí“ pouze naše obvyklé 4 rozměry, gravitační síly se šíří ve všech $4+N$ dimenzích. Gravitační síla pak na vzdálenostech $r \leq r_0$ díky tomu není nepřímo úměrná čtverci vzdálenosti, ale chová se jako $1/r^{2+N}$, což znamená, že na těchto vzdálenostech neplatí Newtonův zákon. Pro $r \leq r_0$ díky tomu intenzita gravitační síly roste daleko rychleji než v Newtonově teorii, což vede k tomu, že na vzdálenostech o mnoho řádů větších než Planckova délka může být srovnatelná s velikostmi ostatních sil. Tyto teorie díky tomuto efektu proto poskytují přirozený rámec pro budování teorií sjednocujících všechny síly, včetně gravitace. Planckova délka v nich nepředstavuje, tak jako v obvyklých strunových teoriích, skutečně fundamentální délku. Tou je již zmíněná škála sjednocení všech sil. Hodnota r_0 je spolu s počtem N extra dimenzí v těchto teoriích volným parametrem, které je třeba určit z experimentu. Ve vysokoenergetických srážkách známých částic by se existence extra dimenzí mohly projevit například tím, že bychom pozorovali nezachování energie a hybnosti, neboť gravitony, které by ve srážkách vznikly, by část energie a hybnosti odnesly do části prostoročasu tvořeného extra dimenzemi, kam my našimi nástroji „nevidíme“. V práci [20] J. Niederle, M. Arai ve spolupráci s E. Ivanovem studovali konkrétní, v jistém smyslu dynamický, model realizace myšlenky, že částice vyjma gravitonu mohou žít jen v podprostoru prostoročasu s extra dimenzemi.

Vývoj detektorů pro experimenty na lineárním urychlovači e+e-

V roce 2004 došlo k dohodě představitelů laboratoří v Evropě, Severní Americe a Asii o základních parametrech příštího urychlovače, jenž bude mít charakter celosvětového projektu, a jímž bude lineární urychlovač vstříčných svazků elektron-pozitron ILC (International Linear Collider) s těžišťovou energií 500-1000 GeV. V březnu 2005 pak byla ustavena komise, která koordinuje celosvětové úsilí o vybudování tohoto urychlovače.

Fyzikální program, jenž bude možné s jeho pomocí uskutečnit, pokrývá široké spektrum problémů od hledání nových částic po provedení přesných měření v intervalu těžišťové energie mezi hmotou Z bosonu a 1 TeV. Prvořadým úkolem je porozumění mechanismu narušení symetrie elektroslabých interakcí.

Z hlediska otázek, na něž mají experimenty na tomto urychlovači odpovědět, je důležité, aby detektory, které se k tomu účelu již vyvíjejí, umožňovaly velmi dobrou identifikaci kvarků



Obr. 24.: Typická srážka vysokoenergetických částic registrovaná jednotlivými komponentami detekční aparatury vyvíjené pro ILC.

různých vůní a gluonů, resp. jetů z nich vznikajících a přesné změření jejich úhlů a energií. To vyžaduje dobře vyvážené rozložení vrcholových a dráhových detektorů, kalorimetrů a dobrou hermetičnost celého detektoru. Praktické zkušenosti z analýzy dat z posledních let,

zejména z Tevatronu ve Fermilab a kritické zhodnocení předností a hlavně nedostatků užívaných detekčních aparatur vedly k zformulování požadavků na detektory pro příští experimenty. Souhrn těchto požadavků je označován jako *energy flow concept* a typická srážka je znázorněna na obr. 24.

Přesnost určení energie jetu závisí na přesnosti určení energie částic jednotlivými subdetektory: nabitých částic dráhovými detektory, fotonů elektromagnetickým a hadronů hadronovým kalorimetrem. To vyžaduje vysokou granularitu a kompaktnost kalorimetru tak, aby přiřazení spršek v kalorimetru k dráhám nabitých částic bylo jednoznačné.

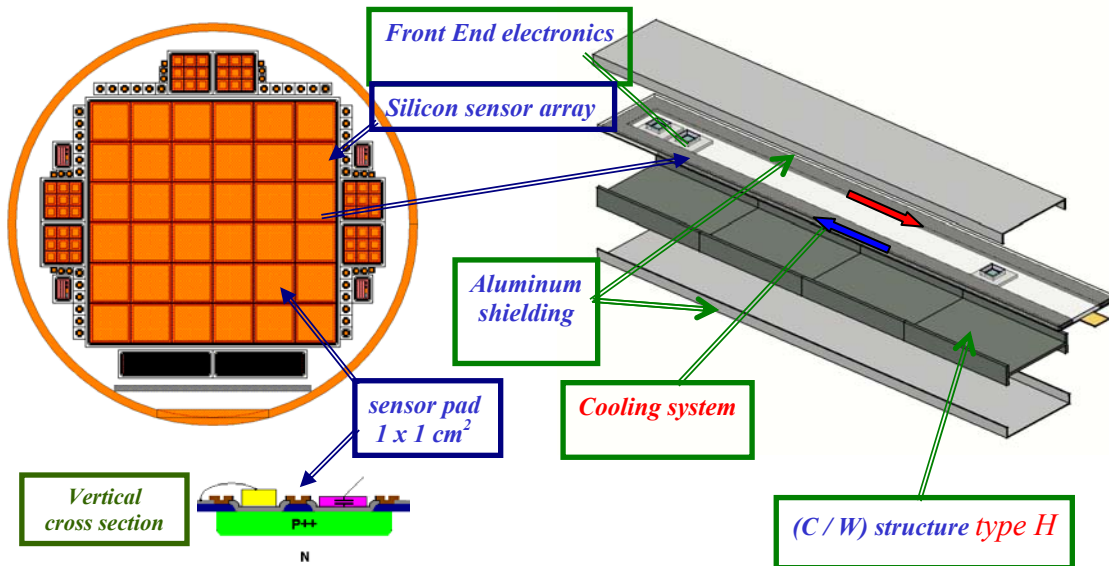
Jednoznačnost trasování částic vyžaduje umístění dráhových detektorů i kalorimetrů dovnitř magnetu, aby jádro magnetu netvořilo „mrtvý“ materiál na dráze částic. Tyto požadavky mají zásadní vliv na celkovou koncepci detekční aparatury:

- Pro **elektromagnetický kalorimetr** se ukazuje být optimální silikon-wolframový kalorimetr, jenž lokalizuje elektromagnetickou spršku v malém objemu a do značné míry může fungovat též jako dráhový detektor.
- **Hadronový kalorimetr** na bázi dlaždicovité struktury železo-scintilátor je praxí ověřená konfigurace. Pro použití v experimentech na ILC je důležité vyřešit sběr světelných záblesků z malých scintilátorových dlaždic a vyvinout fotodetektory pro jejich registraci.

Od roku 2002 jsme členy kolaborace CALICE, která připravuje jeden z projektů kalorimetru pro detektor ILC a sdružuje na 150 fyziků a inženýrů ze 37 laboratoří Evropy, Asie a USA. Aktivně se účastníme vývoje elektromagnetického [21] i hadronového [22] kalorimetru.

Elektromagnetický kalorimetr ECal

Silikon-wolframový elektromagnetický kalorimetr má hexagonální tvar a je tvořen vrstvami wolframových desek jako absorbátor a křemíkových senzorů jako aktivní médium. Na obr.



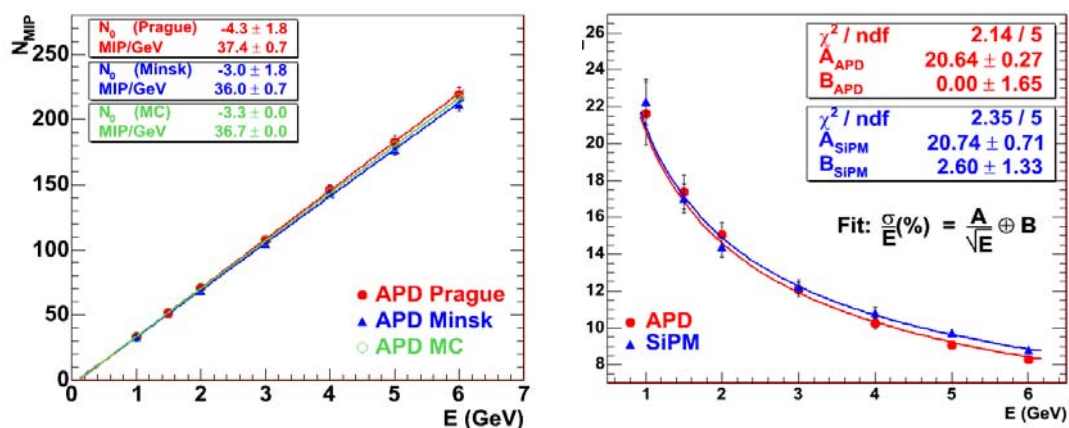
Obr. 25.: Struktura detekčního modulu elektromagnetického kalorimetru

25. je zobrazena struktura detekčního modulu. Sensorová část je tvořena maticí 6x6 padových senzorů o rozměrech 1x1 cm². Křemíkové senzory pro prototyp byly vyrobeny v ON Semiconductor Rožnov pod Radhoštěm.

Hadronový kalorimetr HCal

Je tvořen železem jako absorbátorem, scintilátorem jako aktivním médiem a polovodičovými fotodetektory. Vzhledem k velkému počtu kanálů a zejména proto, že kalorimetr bude pracovat v silném magnetickém poli, nelze použít klasické fotonásobiče a velké úsilí je věnováno vývoji lavinových fotodiód a křemíkových fotonásobičů. Testování a vyhodnocování detekčních charakteristik polovodičových fotodetektorů je jedním z témat, kterým se věnujeme.

V r. 2003 pracovníci FZÚ postavili v DESY kostru malého hadronového kalorimetru nazýva-



Obr. 26 : Závislost odezvy kalorimetru na energii (vlevo) a energetické rozlišení kalorimetru jako funkce energie svazku pro dva polovodičové fotodetektory (vpravo)..

ného MiniCal o rozměrech 20 x 20 x 80 cm. Světlo bylo přiváděno na dva typy fotodetektorů: lavinové fotodiody umístěné vně MiniCalu a křemíkové fotonásobiče nacházející se uvnitř destičky [22]. Oba typy fotodetektorů umožňují práci kalorimetru v silném magnetickém poli o intenzitě několika Tesla. Minical byl v r. 2004 v DESY ozařován ve svazku pozitronů o energii 1–6 GeV. Každý kanál kalorimetru byl kalibrován na signál vyvolaný průchodem pozitronu s energií 3 GeV. Na obr. 26 vlevo je ukázána linearita závislosti odezvy kalorimetru na energii svazku pro dva typy předzesilovačů (napětový vyvinutý v našem ústavu a nábojový vyvinutý v Minsku) a srovnání s MC simulacemi.

Výsledky měření energetického rozlišení kalorimetru ukázaly (obr. 26 vpravo), že oba polovodičové fotodetektory jsou vhodné pro stavbu prototypu kalorimetru, jež začala na jaře 2005 v DESY. Bude mít objem 1 m³ a bude tvořen 40 rovinami scintilátorů o rozměrech 3x3, 6x6 a 12x12 cm². Zkušenosti a výsledky s ním získané budou využity pro vypracování projektu hadronového kalorimetru pro ILC, jež bude mít vysokou granularitu a umožní detekovat nejenom jety ale i dráhy jednotlivých hadronů. .

Na vývoji kalorimetrů pro ILC se podílí 4 fyzikové (J. Cvach, S. Němeček, V. Vrba a J. Zálešák) a 4 inženýři (M. Janata, I. Kacl, I. Polák a K. Zítek).

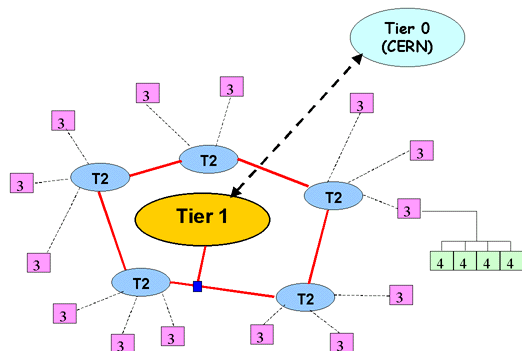
Regionální výpočetní centrum pro fyziku částic

Zpracování velkých objemů dat je typickou potřebou experimentů fyziky částic. Ohromné množství dat pro připravované experimenty na urychlovači LHC si vynutilo vznik nového přístupu k této problematice, jímž je GRID – systém distribuovaného počítání. Experimenty na urychlovači LHC v CERN budou produkovat o 3 řády více dat než předchozí generace experimentů na urychlovači LEP. Experimenty ve fyzice částic vždy využívaly nejlevnější výpočetní prostředky, které byly schopny poskytnout potřebnou službu. Proto byly v druhé polovině devadesátých let opušteny velké superpočítače a postupně nahrazeny levnějšími osobními počítači s operačním systémem Linux.

Výpočetní modely budovaných experimentů počítají s využitím až desítek tisíc procesorů v automaticky spolupracujících výpočetních centrech zúčastněných států. Typický požadavek experimentů je, že každý spolupracovník experimentu musí mít možnost využívat libovolný prostředek experimentu a mít přístup ke všem datům experimentu. Pro takové požadavky ovšem neexistovaly programové prostředky a bylo nutno je vytvořit.

CERN získal v roce 2001 podporu Evropské unie pro tříletý výzkumný program DataGrid. Během tohoto programu byla formována konkrétní představa řešení problému a otestovány programové prototypy. Souběžně s programem DataGrid vznikly další výzkumné programy v Evropě i v Americe, které sdílely výsledky a pokračovaly ve vývoji gridového prostředí. Na program DataGrid v dubnu 2004 navázal dvouletý program EGEE koordinovaný CERN, jehož cílem je vytvořit rozsáhlou gridovou strukturu v Evropě, napojit ji na spolupracující projekty v Americe a zpřístupnit Grid dalším oborům a průmyslu. Úkolem programu CERN LCG (LHC Computing Grid) [23] je připravit programové a hardwarové prostředí pro zpracování dat ze všech experimentů na urychlovači LHC v CERN.

Experiment ATLAS plánuje vyprodukovat ročně několik petabytů dat. Pro jejich zpracování byl vytvořen hierarchický model výpočetních center (obr. 27). Centrum umístěné u experimentu produkujícího data je označováno jako centrum úrovně TIER0; zde jsou data ukládána a probíhá jejich první zpracování. Velké experimenty mají typicky kolem 6 velkých národních center označovaných jako TIER1, kde jsou uložena „surová“ data, probíhá zde opakova-



Obr. 27: Schematické znázornění hierarchického uspořádání výpočetních center. Tato struktura se bude týkat především technické podpory center i uživatelů, neboť model GRIDu umožňuje neomezenou vzájemnou komunikaci všech center.

né zpracování dat a jsou zde uložena simulovaná data produkovaná v centrech TIER2, která spolupracují s jedním centrem úrovně TIER1. V centrech TIER2 probíhají již zmíněné počítačové simulace činnosti detektoru a fyzikální analýza dat skupinami fyziků. Následující úrovní jsou centra TIER3, což jsou určité terminály pracovních skupin například na univerzitách, které zprostředkují jednotlivým fyzikům připojení jejich osobních výpočetních prostředků na úrovni TIER 4.

Ve FZÚ vzniklo v roce 2005 Regionální výpočetní centrum pro fyziku částic [24], které má na 200 procesorů a 40 TB diskového prostoru (obr. 28 vlevo a uprostřed).

Vznik centra umožnil FZÚ výstavbou nové moderní serverovny s příkonem 150 kW pro počítače, odpovídající klimatizací, zdrojem nepřerušitelného napětí a dieselovým agregátem. Dále se podařilo získat finanční prostředky od AV ČR a jednotlivých experimentálních skupin v ČR na výpočetní prostředky a počítačové komunikace. Centrum je standardní součástí gridů LCG a EGEE a dodává všechny očekávané služby oprávněným uživatelům. Slavnostní otevření centra se konalo 1. 11. 2004 za přítomnosti předsedkyně AV ČR (obr. 28 vpravo) a dal-

ších hostů. Regionální výpočetní centrum dodává polovinu své výpočetní kapacity pro experiment DØ ve Fermilab a druhou polovinu pro experimenty ATLAS a ALICE na urychlovači LHC v CERN.



Obr. 28: Vlevo nová serverovna FZÚ, uprostřed počítače ve skříních, vpravo předsedkyně AV ČR H. Illnerová a ředitel FZÚ K. Jungwirth při slavnostním otevření Regionálního výpočetního centra pro fyziku částic dne 1. 11. 2004.

Experimenty na urychlovači LHC již několik let připravují a testují svůj výpočetní model v rozsáhlých testech, jichž se aktivně účastníme [25], v nichž jsou simulovány milióny srážek a odezva detektorů na jimi procházející částice. Tyto simulace umožňují optimalizovat detektory, prověřit programy pro zpracování dat a připravit fyzikální analýzu nabraných dat. Po spuštění LHC bude centrum zpracovávat skutečná data z experimentů ATLAS a ALICE.

Členy pracovního týmu Regionálního výpočetního centra jsou L. Fiala, J. Chudoba, P. Kolář, J. Krásová, M. Lokajíček, J. Kosina, K. Píška a J. Švec.

Další aktivity

Jak je patrné z předchozích stránek, je náš podíl ve výše zmíněných experimentech na urychlovačích v **CERN**, **DESY** a **Fermilab** i v projektu **Observatoře Pierra Augera** a na vývoji detektorů pro **ILC** významný a všestranný, tj. pokrývá všechny základní stránky dnešních experimentů. Jednotlivci z naší sekce se ovšem účastní i tří dalších experimentů v CERN: **NA57** (P. Závada), **ALICE** (P. Závada a J. Chudoba) a **Dirac** (J. Smolík).

Experiment **NA57** zkoumá srážky těžkých iontů na urychlovači SPS v CERN a experiment **ALICE** se bude této problematice věnovat na urychlovači LHC. Experimentální a teoretické studium srážek těžkých iontů při vysokých energiích je velmi zajímavé, neboť přináší mnoho zajímavých poznatků o chování hmoty při velkých hustotách. Ty jsou – mimo jiné – důležité pro pochopení počáteční etapy vývoje vesmíru. Experiment NA57 dokončuje analýzu dat nabraných v minulých letech a experiment ALICE je podobně jako ATLAS ve stádiu výstavby. Do tohoto experimentu přispíváme především prostřednictvím výpočetních kapacit našeho Regionálního výpočetního centra (viz výše). V experimentu **DIRAC** se z měření korelací pionů odvozují vlastnosti atomů složených ze dvou pionů. Naší prioritou je ovšem účast v experimentu ATLAS a proto neuvážujeme o rozšíření naší účasti v těchto menších aktivitách.

Již řadu let je součástí našich aktivit výzkum teoretických aspektů působení svazků různých částic (fotonů, elektronů a hadronů) na buňky živých organismů a s tím spojených možností využití těchto svazků v lékařství. Této problematice, která je podrobněji popsána v [1], se věnuje M. Lokajíček st., P. Kundrát a doktorandka H. Hromčíková.

Důležitou součástí našeho výzkumného programu je jeho popularizace. Podrobné informace o všech našich aktivitách lze najít na jejich vlastních webových stránkách. Vhodnou vstupní branou k nim i mnoha dalším informacím o fyzice částic v ČR je portál [26], kde je k dispozici i celá řada textů pro středoškolské studenty a širší veřejnost. Této činnosti i zmíněnému portálu se systematicky věnuje Jiří Rameš.

Naše experimentální aktivity se opírají o tým (K. Albert, Z. Kotek, J. Weicher, J. Tempír, V. Zamazal, M. Coufalová, E. Grunthálová, A. Mocová, J. Pešková, O. Strejcová) zkušených technických pracovníků, schopných zvládnout náročné elektronické a mechanické práce, které jsou nezbytné pro vývoj nových detektorů a bez nichž bychom se v mezinárodních kolaboracích nemohli prosadit.

Odkazy (autoři z FZÚ podtrženi):

- [1] J. Chýla a kolektiv: Čs. čas. fyz. 53 (2003), 215
- [2] A. Aktas, J. Cvach, I. Herynek, J. Hladký, P. Reimer, K. Sedlák, M. Taševský, J. Zálešák et al. (H1 Collab.): Eur. Phys. J. C, hep-ex/0411046
- [3] A. Aktas, J. Chýla, J. Cvach, I. Herynek, J. Hladký, P. Reimer, K. Sedlák, M. Taševský, J. Zálešák et al. (H1 Collab.): Eur. Phys. J. C **37** (2004), 141
- [4] A. Aktas, J. Cvach, I. Herynek, J. Hladký, P. Reimer, K. Sedlák, M. Taševský, J. Zálešák et al. (H1 Collab.): Phys. Lett. B588 (2004) 17-28 , 03/04
- [5] http://www-d0.fnal.gov/www_buffer/pub/publications.html
- [6] <http://www-d0.fnal.gov/Run2Physics/WWW/results/prelim/QCD/Q04/Q04.pdf>
- [7] DØ Collaboration (A. Abazov et. al): přijato v Phys. Rev. Lett., hep-ex/0409040
- [8] http://atlas.web.cern.ch/Atlas/SUB_DETECTORS/TILE/tilecal.html
<http://www.particle.cz/atlas/Tilecal.html>
- [9] Auger Collaboration: Nuclear Instruments and Methods A 523 (2004) 50-95
- [10] P. Privitera et al.: Příspěvek na 28. Mezinárodní konferenci o kosmickém záření ICRC, Tsukuba, Japan, srpen 2004
- [11] <http://www-hep2.fzu.cz/Auger/>
- [12] I. Caprini, J. Fischer: Phys. Rev. D **68** (2003) 114010
- [13] J. Fischer, J. Chýla: Acta Physica Slovaca 52 (2002), 483
- [14] P. Závada, Phys.Rev. D **56**, (1997), 5834, D **65** (2002), 054040, D **67** (2003), 014019
- [15] V. Efremov, O.V. Teryaev and P. Závada, Phys.Rev. D **70**, 054018 (2004).
- [16] V. Kandrát, M. Lokajíček: Z. Phys. C63 (1994) 619
- [17] V. Kandrát, M. Lokajíček a D. Krupa: Phys. Lett. B544 (2002) 132
- [18] J. Niederle, A.G. Nikitin: Phys. Rev. D **64** (2001), 125013-1 – 125013-11
- [19] J. Niederle, A. G. Nikitin: Phys. Rev. D, v tisku
- [20] M. Arai, E. Ivanov, J. Niederle: Nucl. Phys. B **680** (2004),
- [21] http://lcws2002.korea.ac.kr/slides/parallel/H/VaclavVrba_Vrba-Korea2002-x.ppt
- [22] V. Andreev, ..., J. Cvach, M. Janata, I. Kacel, S. Němeček, I. Polák, J. Weichert, J. Zálešák: Nucl. Instr. Methods A546 (2005) 368-380.
- [23] <http://lcg.web.cern.ch/LCG/>
- [24] <http://www.particle.cz/farm/>
- [25] R. Sturrock, ..., J. Chudoba, J. Kosina, M. Lokajíček, J. Švec: CERN-PH-EP-2004-28 Nucl. Instr. Methods A, v tisku
- [26] <http://www-hep2.fzu.cz/~rames/outreach/castice.html>

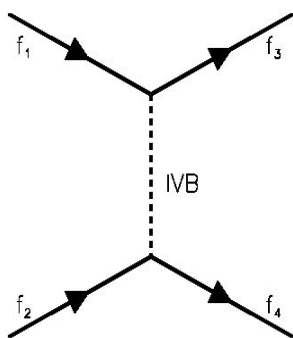
Dodatek: standardní model v kostce

Současný stav našich znalostí zákonů mikrosvětla je shrnut v tzv. **standardním modelu**. Podle něj jsou základními stavebními kameny hmoty tři **generace fundamentálních fermionů**, tj. částic se spinem 1/2, jež se dále dělí na **kvarky a leptony**

Generace	základní fermiony			Síly		
	1	2	3	náboj	název	zprostředkující částice
Kvarky	u u u	c c c	t t t	2/3	elektromagnetické	foton
	d d d	s s s	b b b	-1/3	slabé	W^+, W^-, Z
Leptony	ν_e	ν_μ	ν_τ	0	silné	gluony
	e	μ	τ	-1		

Každý z šesti kvarků, označovaných symboly u (z anglického up), d (down), s (strange), c (charm), t (top), b (bottom), existuje ještě ve třech různých mutacích, nazývaných „**barvy**“. Z kvarků první generace jsou složeny například protony a neutrony, jež spolu s elektrony vytvářejí atomy a tím i většinu hmoty na Zemi i ve viditelné části vesmíru.

Mezi kvarky a leptony působí čtyři typy sil: **gravitační, elektromagnetické, slabé a silné**. Kromě gravitační, jež v mikrosvětě nehraje prakticky žádnou roli, mají ostatní síly důležitou společnou charakteristiku: lze je popsat pomocí výměny zprostředkujících částic, nazývaných **intermediální vektorové bosony**, znázorněné na obrázku vlevo. Výraz „vektorové“ znamená, že tyto částice mají spin 1. Základní rozdíl mezi kvarky a leptony je v tom, že silné síly



působí jen na "barevné" částice a tedy jen mezi kvarky. Právě tyto síly zodpovídají za vazbu kvarků uvnitř protonů a neutronů a s elektromagnetickými silami za existenci a vlastnosti atomů. Ani bez slabých sil by ovšem vesmír nevypadal tak, jak vypadá. Ačkoliv jsou skutečně slabé na vzdálenostech řádu průměru protonu, mají jednu důležitou vlastnost: **nejsou invariantní vůči prostorové (P) a nábojové (C) inverzi** (tj. záměně pojmů "vpravo" a "vlevo", resp. "částice" a "antičástice"), ba **ani vůči kombinované prostorové a nábojové inverzi**. Právě narušení této kombinované CP invariance je přitom podle našich dnešních znalostí klíčem k pochopení, proč je

ve vesmíru více hmoty než antihmoty.

Kromě částic uvedených v tabulce hraje ve SM důležitou roli i dosud neobjevený tzv. **Higgsův boson**, částice se spinem nula, jež je ve standardním modelu v obrazném slova smyslu odpovědná za velikost hmotností kvarků, leptonů a intermediálních vektorových bosonů.

Elektromagnetické a slabé síly jsou v rámci SM popsány teorií, formulovanou koncem 60. let minulého století S. Glashowem, S. Weinbergem a A. Salamem (**GSW teorie**). Teorie silných sil byla formulována v roce 1973 D. Grosseem, F. Wilczekem a D. Politzerem. Její název **kvantová chromodynamika** (QCD) odráží skutečnost, že tato síla působí jen na částice nesoucí barvu.

I když kvarky nelze z protonu či neutronu vyrazit, experimentálně zjišťujeme, že je-li energie vyráženého kvarku či gluonu dostatečně velká, vylétají ve směru kvarků či gluonů úhlově kolimované svazky částic, nazývané „**jety**“. Z měření jejich vlastností pak usuzujeme na dynamiku samotných kvarků a gluonů. Jety dnes hrají při hledání zákonů mikrosvětla stejnou roli, kterou v minulosti hrály částice samotné.

Pro svět subatomárních částic je mezinárodní systém jednotek nevhodný a je proto zvykem používat přirozené jednotky. V případě energie je jí gigaelektronvolt (GeV), tj. miliarda elektronvoltů a v případě délky femtometr (fm), tj. milióntina miliardtiny metru. Je to proto, že klidová hmotnost protonu odpovídá energii zhruba 1 GeV a jeho poloměr činí zhruba 1 fm.