

Padesát let fyziky elementárních částic ve FZÚ¹

Založení Fyzikálního ústavu spadá do období, kdy se z jaderné fyziky vydělil obor, jehož předmětem zájmu byly vlastnosti a interakce částic, které je dnes zvykem nazývat „elementární“. Patřily mezi ně vedle elektronu, protonu, neutronu, mionu a pionu, které byly již určitou dobu známé, i částice, jež byly objevovány od počátku 50. let minulého století (specifikaci „minulé století“ budeme v dalším vypouštět). Jaderná fyzika byla od objevu atomového jádra v roce 1911 po zhruba 40 let „fyzikou elementárních částic“. V padesátých letech se situace změnila (a ještě jiná je dnes) – smysl pojmu „elementární částice“ se tedy nutně mění s časem. Roku 1953 byl v Brookhavenské národní laboratoři v USA spuštěn urychlovač protonů s energií 3 GeV, na němž byla během několika let objevena řada nových částic, jež sehrály klíčovou roli při budování základního rámce dnešního obrazu mikrosvěta. Tento urychlovač byl první z řady nové generace velkých urychlovačů v USA i Evropě, které nahradily kosmické záření jako hlavní zdroj nově objevovaných částic a jevů. Druhá polovina padesátých let přinesla zlom i v metodách detekce částic: mlžné komory a jaderné emulze byly pozvolna nahrazeny bublinovými komorami, jež pak byly po dvě desetiletí hlavním nástrojem studia vlastností stále rostoucí rodiny známých elementárních částic.

Kořeny

Obor fyziky elementárních částic, dále jen „fyziky částic“, navázal v Československu na dobrou tradici experimentálního i teoretického výzkumu v době před 2. světovou válkou. K rychlému rozvoji jaderné fyziky došlo ihned po otevření vysokých škol v roce 1945. Z ní se



Obr. 1: Jaroslav Pernegr stál u zrodu Fyzikálního ústavu i fyziky elementárních částic v Praze.

pak brzy vyčlenila specializovaná oblast fyziky částic. Velkou podporu jejímu vzniku věnovali **Václav Petržílka** (1905-1976), který před válkou pracoval v Cavendishově laboratoři v Anglii, a **Václav Votruba** (1909-1990), který dosáhl významného uznání ve světě během svého pobytu u prof. G. Wentzela v Zurichu v letech 1946-1947. K rozvoji experimentálního výzkumu ve fyzice částic ve Fyzikálním ústavu (i v celém Československu) pak rozhodujícím způsobem přispěl **Jaroslav Pernegr** (1924-1988). Od počátku 50. let byli Václav Petržílka i Václav Votruba profesory fyziky na Přírodovědecké fakultě a po roce 1952 pak na nově založené Matematicko-fyzikální fakultě Karlovy univerzity. V roce 1955 oba přešli na nově založenou Fakultu technické a jaderné fyziky Karlovy university, jež byla v roce 1959 celá převedena na ČVUT. V rámci reorganizace výuky jaderné fyziky přešla část pedagogů FTJF,

¹ Cílem tohoto textu je seznámit čtenáře se současným stavem našich znalostí základních zákonů mikrosvěta, cestě k nim i perspektivách dalšího vývoje a také vylíčit, jak jsme se na tomto výzkumu podíleli a podílíme my ve Fyzikálním ústavu. Čtenáře chceme zaujmout podstatou otázek, před nimiž dnešní fundamentální fyzika stojí a nikoliv historicky a věcně vyčerpávajícím výčtem konkrétních jmen a výsledků, které jsme za uplynulých 50 let dosáhli. Ty lze nalézt v příloze k tomuto textu, dostupné na <http://www-hep.fzu.cz/vyroci/vysledky.pdf>, jež obsahuje také citace na nejdůležitější práce týmu a jednotlivců naší sekce za celé půlstoletí. Připojeny jsou i odkazy na přehledné články týkající se historie fyziky částic ve světě i u nás, na články a webové materiály popularizačního charakteru a zdroje informací o vlastnostech všech dnes známých částic.

mezi nimi i profesor Votruba, v roce 1967 zpět na MFF UK. Václav Votruba i Václav Petržílka se zásadním způsobem zasloužili o to, že fyzika částic se stala součástí vědeckého programu Fyzikálního ústavu již od jeho založení.

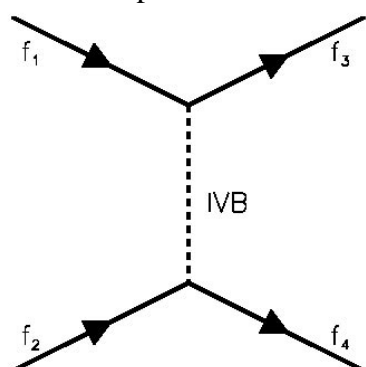
Co dnes o mikrosvětě víme

Základní znalosti zákonů mikrosvěta získané studiem vlastností a srážek elementárních částic za uplynulých 50 let jsou shrnuty v tzv. **standardním modelu** (SM). Podle něj jsou základními stavebními kameny hmoty tři tzv. **generace fermionů**, tj. částic se spinem 1/2, jež se dále dělí na **kvarky a leptony**

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

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 stavech, poeticky 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 jednu důležitou společnou charakteristiku: lze je popsat pomocí výměny, schématicky znázorněné



Obr. 2: Diagram znázorňující výměnný mechanismus sil působících mezi kvarky a leptony (f_i) ve SM.

na obr. 1, zprostředkujících částic, tzv. **intermediálních vektorových bosonů** (IVB), jež mají všechny 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 (CP)**. Přitom právě narušení CP invariance je klíčem k pochopení

skutečnosti, proč je ve vesmíru více hmoty než antihmoty a proč tedy vůbec existujeme.

Kromě částic uvedených v tabulce hraje ve SM důležitou roli i 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.²

Elektromagnetické a slabé síly jsou v rámci SM popsány sjednocenou teorií elektroslabých sil, formulovanou koncem 60. let Sheldonem Glashowem, Abdusem Salamem a Stevenem

² Pro svět subatomárních částic je mezinárodní systém jednotek nevhodný a je proto zvykem používat přirozené jednotky, jimiž je v případě energie elektronvolt (eV), či dnes spíše gigaelektronvolt (GeV= miliarda eV). Klidová hmotnost protonu přitom odpovídá energii 0.94 GeV.

Weinbergem (**GSW teorie**), kteří za ni dostali v roce 1979 Nobelovou cenu za fyziku. Teorie silných sil byla formulována počátkem v roce 1973 Davidem Grosseem, Frankem Wilczekem a Davidem Politzerem. Její název **kvantová chromodynamika** (QCD) odráží skutečnost, že tato síla působí jen na částice nesoucí barvu. Poznání, že QCD netrpí problémy, kvůli nimž v polovině 50.let ochladla důvěra v kvantovou teorie pole, znamenalo dramatický přelom. Klíčovou vlastností kvantové chromodynamiky je skutečnost, že *teorie silných sil je tím jednodušší, čím jsou vzdálenosti mezi kvarky, antikvarky a gluony menší*. Na vzdálenostech menších než asi 1 femtometr můžeme k jejich popisu v principu použít základní nástroj kvantové teorie pole - **poruchovou řadu**.

Důležitou roli při vzniku QCD sehrál **kvark-partonový model**, formulovaný Richardem Feynmanem koncem 60. let pro fenomenologický popis tvrdých srážek elektronů s nukleony. Experimenty prováděné v té době ve SLAC ukazovaly, že protony a neutrony se v těchto srážkách chovají jako svazek vzájemně slabě interagujících bodových částic, jež měly stejná kvantová čísla jako kvarky. To bylo překvapivé, neboť žádné volné kvarky nebyly do té doby (a ani dosud) pozorovány. Skutečnost, že QCD je schopna smířit tak odlišné jevy, je netriviální a představuje triumf základního teoretického rámce, v němž se fyzika částic pohybuje: **kvantové teorie pole**.

Skutečnost, že kvarky a gluony, na rozdíl od leptonů, neexistují jako volné částice a že má přesto smysl o nich mluvit jako o základních stavebních kamenech hmoty, se opírá o důležité zjištění. Ačkoliv izolované kvarky nelze z protonu či neutronu vyrazit, na rozdíl od elektronů z atomu, pozorujeme, že je-li energie vyraženého 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 klíčovou roli, kterou v minulosti hrály jen částice samotné.

.... a co si domýšlíme

Standardní model je, až na stále otevřenou otázku existence Higgsova bosonu, experimentálně prověřen do značných podrobností a poskytuje odpovědi na mnoho otázek týkajících se struktury hmoty. Některé zásadní otázky ovšem ponechává nezodpovězeny:

- Proč existují právě tři generace kvarků a leptonů?
- Proč mají takové elektrické náboje a hmotnosti, jaké mají?
- Existují i další síly, o nichž dosud nic nevíme?
- Jsou kvarky a leptony skutečně fundamentální, nebo i ony mají vnitřní strukturu?
- Mají všechny čtyři známé síly společný původ?
- Jak může být gravitace zahrnuta do standardního modelu?
- Proč je ve vesmíru přebytek hmoty nad antihmotou?

Odpovědi na tyto a řadu dalších otázek hledají experimenty, jichž se účastníme. Hledá je ovšem i teorie sama, neboť poněkud překvapivě fyzika částic již téměř tři desetiletí "čeká" na nějaký skutečně zásadní objev, který by rozhodujícím způsobem pomohl orientovat teoretické úvahy jdoucí za SM, tak jak byl načrtnut v předchozích odstavcích. Ten je totiž přes svou dosavadní úspěšnost při popisu mikrosvětla z řady hledisek nedokonalý a představuje jen určitou aproximaci hlubších fyzikálních zákonitostí. V takové situaci je proto přirozené, že se hnacím motorem teorie v posledních zhruba 20 letech staly snahy vybudovat teorii, která by byla nejen matematicky konsistentní a v jistém, byť nutně subjektivním, smyslu "krásná", ale která by také odpověděla aspoň na některé z výše uvedených otázek.

Nejambicióznější pokus v tomto směru vychází z předpokladu, že zákony mikrosvětla splňují speciální typ vnitřní symetrie, tzv. **supersymetrii**, tj. symetrii mezi fermiony a bosony. Ta

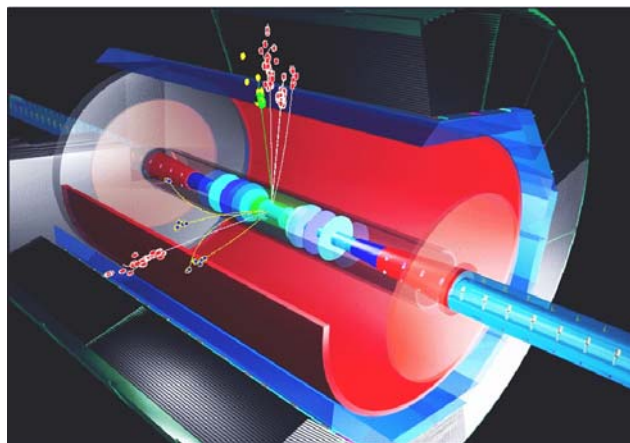
postuluje, že ke každému kvarku a leptonu z tabulky fundamentálních fermionů, i každému intermediálnímu vektorovému bosonu elektroslabých a silných interakcí, existují jejich **supersymetriční partneři**. Ti mají mít spin, jenž se od spinu jejich „normálních“ partnerů liší o jednu polovinu, a supersymetrie tedy koreluje částice s různým spinem. To představuje skutečně revoluční myšlenku a hledání supersymetrických částic je proto předmětem experimentálního zájmu již po více než dvě desetiletí. Skutečnost, že zatím žádná taková částice nebyla nalezena, znamená, že pokud existují, musí být jejich hmotnosti tak velké, že pro jejich produkci nestačí ani dnešní nejmohutnější urychlovače.

Jedním z hlavních argumentů pro supersymetrii je zjištění, že existence supersymetrických partnerů částic SM odstraňuje některé problémy teorií usilujících o sjednocení elektroslabé a silné síly v rámci **teorie velkého sjednocení** (Grand Unified Theory, zkráceně GUT). Supersymetrie je součástí většiny dnešních modelů GUT, obzvláště těch, které se snaží do jednotné teorie zahrnout i gravitaci. V tomto případě jde předvoj teorie ještě dál a postuluje, že **základním objektem mikrosvěta nejsou částice, bodové objekty, ale struny**, či dokonce vícerozměrné membrány, které se pohybují ve více než čtyřrozměrném prostoročasu. Další rozměry prostoročasu jsou podstatné, neboť právě ony mohou poskytnout klíč ke sjednocení teorie gravitace s kvantovou teorií. Klasická teorie gravitace je totiž přirozenou limitou kvantových teorií strun na velkých vzdálenostech. Nedílnou součástí teorií strun je ovšem také mechanismus zajišťující, že vnímáme jen tři prostorové a jeden časový rozměr. Fyzika je ovšem v zásadě empirická věda, a tak o tom, zda v mikrosvětě vládne supersymetrie či dokonce superstruny, rozhodne experiment. Proto je s takovým napětím očekáváno spuštění urychlovače LHC v CERN, který bude na dlouhou dobu jediným zařízením, kde je naděje projevy supersymetrie pozorovat.

Je ovšem také možné, že ani kvarky a leptony nejsou základní úrovní struktury hmoty, ale že i ony jsou v jistém smyslu složeny z nějakých ještě elementárnějších objektů. Tato přirozená myšlenka **substruktury kvarků a leptonů** má dlouhou historii, ale zatím se nepodařilo zkonstruovat nějaký matematicky konsistentní model, který by byl současně fyzikálně relevantní. I tak má ovšem stále smysl tuto možnost zkoumat experimentálně. Zatím ovšem neexistují žádné jasné příznaky, že kvarky a leptony nějakou substrukturu mají.

Jak se dělá fyzika elementárních částic ve světě

Výzkum, především experimentální, v oblasti fyziky částic má několik charakteristických rysů, jimiž jsou **velké týmy, široká mezinárodní spolupráce, vysoká koncentrace prostředků a základních zařízení a dlouhodobý charakter**. Tyto rysy vykrytalizovaly během 50. a 60. let a jsou dány samotnou povahou výzkumu v této oblasti fyziky. Zatímco při objevu



Obr.3: Schéma detekční aparatury pro studium srážek protiběžných svazků částic pohybujících se v trubici.

atomového jádra stačili Rutherfordovi dva asistenti, kteří po několik týdnů obsluhovali zařízení, jež mělo rozměr většího hrnce, dnešní experimenty sice v zásadě opakují základní schéma tohoto pokusu, ale jeho realizace je dramaticky jiná. Dnes čítají experimentální týmy stovky fyziků z desítek zemí, kteří po léta vyvíjejí detektory vážící tisíce tun, aby je pak deset a více let provozovali v několika málo mezinárodních střediscích, kde se nachází to nejdražší: mohutné urychlovače.

Až do konce 60. let měly všechny urychlovače stejné základní uspořádání:

svazkem urychlených částic byly ostřelovány částice v nepohyblivých terčích, jimiž byly buď kusy pevných látek nebo plyny uzavřené v stacionárních nádobách. Od počátku 70. let se stále více uplatňují tzv. urychlovače vstřícných svazků (v dalším pro jednoduchost nazývané *srážecí*) na nichž se srážejí protiběžné svazky protonů, antiprotonů, elektronů nebo pozitronů, které jsou předtím standardním způsobem urychleny. Výhoda tohoto uspořádání, schématicky znázorněného na obr. 1, oproti klasickým urychlovačům je v tom, že při čelní srážce dvou částic je jejich energie lépe využita, podobně jako jsou důsledky čelní srážky dvou aut daleko horší, než pokud jedno z nich stojí. V dnešní době toto uspořádání převažuje.

Klíčovou roli při budování a provozu dnešních experimentů a následném zpracování dat hrají výpočetní a komunikační technologie. Obrovské objemy dat a požadavky na jejich rychlý přenos byly v minulosti podnětem k rozvoji těchto technologií a zůstávají jimi i dnes. Charakteristické je také velmi úzké propojení experimentu a teorie, neboť již při získávání experimentálních údajů je nezbytné využití stávající teorie pro stanovení účinnosti detektorů.

Finanční náročnost a složitost dnešních experimentů je taková, že mezinárodní spolupráce je ve fyzice částic nevyhnutelností. Ve světě je dnes šest hlavních středisek experimentálního výzkumu: **Evropské středisko fyziky částic CERN** v Ženevě a **německá národní laboratoř DESY** v Hamburku v Evropě, **Fermiho národní laboratoř FERMILAB** u Chicaga, urychlovačové centrum **SLAC** ve Stanfordu a **Brookhavenská národní laboratoř BNL** v USA a laboratoř **KEK** v Japonsku. S prvními třemi jmenovanými úzce spolupracujeme.



Evropské středisko fyziky částic CERN v Ženevě bylo založeno v roce 1954 jako jedna z prvních celoevropských institucí poválečné Evropy. V současné době má CERN 20 členských států a spolupracuje s dalšími organizacemi a státy. CERN provozoval řadu urychlovačů, na kterých bylo učiněno mnoho důležitých objevů. Zmíníme jen jeden, jenž měl pro další vývoj CERN klíčový význam. Tým vedený **Carlo Rubbiou** využil originální myšlenku **Simona Van der Meera**, jak vytvořit dostatečně intenzivní svazek antiprotonů a na srážeci protonů a antiprotonů v roce 1983 objevil *intermediální vektorové bosony W^+ , W^- a Z* . Za tento objev, jenž definitivně potvrdil správnost základní myšlenky standardního modelu, získali Rubbia a Van der Meer v roce 1984 Nobelovu cenu za fyziku. Pro podrobný výzkum vlastností těchto částic byl v CERN postaven srážecí elektronů a pozitronů **LEP** o obvodu 27 kilometrů a energii až 100 GeV na svazek. Za 11 let své existence, od roku 1989 do konce roku 2000, na něm bylo ve čtyřech experimentech zaregistrováno celkem asi 20 miliónů případů produkce částice Z . Tato měření významným způsobem přispěla k rozšíření našich znalostí zákonů mikrosvěta. V roce 1995 bylo rozhodnuto umístit po skončení programu LEP v jeho tunelu urychlovač **LHC** (Large Hadron Collider). LHC, jenž bude poskytovat vstřícné svazky protonů, každý o energii 7000 GeV, má být spuštěn v roce 2007. Nejméně po další desetiletí bude jediným místem, kde lze očekávat zásadní objevy. Účast v experimentech na LHC je proto z hlediska dlouhodobé perspektivy našeho výzkumného programu prioritou.

CERN není ovšem jen provozovatelem urychlovačů, ale i vedoucí světovou laboratoř v oblasti vývoje detektorů a informačních technologií. **Georges Charpak**, specialista na vývoj detektorů částic, získal v roce 1992 Nobelovu cenu za vynález a vývoj mnohohrátových proporciálních komor, vyvinutých v CERN pro potřeby experimentů částicové fyziky. Tyto komory, jež otevřely novou éru plně elektronických detektorů částic, mají dnes široké využití i mimo fyziku částic, například v biologickém výzkumu, či v lékařské diagnostice.

Nejnámější příklad dopadu základního výzkumu v CERN mimo oblast částicové fyziky je zdroj webu. Počítačový specialista **Tim Berners-Lee** pracoval počátkem 90. let v CERN na vývoji systému komunikace a sdílení dat v rámci velkých experimentů na urychlovači LEP.

K tomuto účelu vyvinul systém využívající technologie osobních počítačů, počítačových komunikací, hypertextových odkazů a prohlížečů, z něhož pak *vznikl dnešní web*.



Německá národní laboratoř DESY (Deutsches Elektronen Synchrotron) je další velkou laboratoří fyziky částic, s níž nás váže dlouholetá spolupráce. Od svého založení v roce 1959 se zaměřila na experimentální výzkum mikrosvěta pomocí svazků elektronů a později i pozitronů. Jak naznačuje její jméno, prvním urychlovačem byl elektronový synchrotron, spuštěný v roce 1965. V roce 1974 začaly v DESY experimenty na urychlovači vstříčných svazků elektronů a pozitronů **DORIS**, jež významně přispěly ke studiu vlastností částic objevených rok předtím ve SLAC. Vedoucí role DESY na poli urychlovací technologie byla potvrzena v roce 1978, kdy byla v DESY uvedena do provozu **PETRA**, ještě větší urychlovač tohoto typu, jenž byl po několik let největším srážecem elektronů a pozitronů na světě. Nejdůležitějším objevem učiněným na tomto urychlovači byl experimentální *důkaz existence gluonů* v roce 1979.

Za své postavení mezi světovými středisky fyziky částic DESY vděčí rozhodnutí využít urychlovač PETRA jako zdroj elektronů pro urychlovač vstříčných svazků elektronů a protonů **HERA**, jenž byl spuštěn v roce 1991 a bude v provozu do roku 2007.

Významným rysem DESY je podpora interdisciplinárního výzkumu. Po ukončení základního výzkumu byl urychlovač DORIS přebudován na *zdroj synchrotronového záření*, jenž od roku 1980 poskytuje 15 svazků, které využívají skupiny z řady zemí pro výzkum v oblasti fyziky pevných látek, materiálového výzkumu, biologie, lékařství a pod.

V posledních několika letech DESY investovala velké úsilí do vývoje základního konceptu a technologie *srážecí elektronů a pozitronů o energiích 300-500 GeV* na svazek. Urychlovač tohoto typu je dnes všeobecně považován za nejhodnější „nástupnické“ zařízení po LHC, na němž bude možné hledat odpovědi na řadu klíčových otevřených otázek o mikrosvětě, na něž dnes neznáme odpověď. DESY pokročila ze všech světových laboratoří nejdále v přípravě konkrétního projektu takového urychlovače, ale ukazuje se, že vzhledem k finanční náročnosti má tento nový urychlovač šanci jen jako mezinárodní projekt.



Fermilab

Fermiho národní laboratoř, nejvýznamnější laboratoř fyziky částic v USA, byla založena v roce 1967 nedaleko Chicaga. Na původním urychlovači protonů o energii 400 GeV o obvodu 6 kilometrů byl v roce 1977 týmem vedeným **Leonem Ledermanem**, laureátem Nobelovy ceny za fyziku v roce 1988, *objeven b-kvark*. Po přebudování na srážecí protonů a antiprotonů zvaný **TEVATRON**, s energiemi 900 GeV na svazek, se FERMILAB stal v roce 1992 provozovatelem největšího urychlovače protonů na světě. Následující 4 roky byly věnovány především hledání šestého kvarku, pro jehož existenci existovaly silné teoretické argumenty, a výzkumu tvrdých srážek neutronů s protony. Pro ně poskytoval TEVATRON nejkvalitnější svazek mionových neutronů na světě. Poté, co byl v roce 1994 *top-kvark objeven* a byla tak završena prověrka základního rámce standardního modelu, začala přestavba urychlovače i modernizace detekčních aparatur obou hlavních experimentů: **CDF a D0**. Ta skončila v roce 2001 a od té doby probíhá další etapa experimentů, jež má pokračovat až do roku 2009.

TEVATRON v současné době poskytuje srážky protiběžných svazků protonů a antiprotonů s energiemi 1000 GeV. Až do spuštění urychlovače LHC v CERN bude místem, kde existují nejhodnější podmínky pro pozorování nových jevů i pro podrobné testy SM.



Mezinárodní centrum teoretické fyziky (ICTP) v Terstu. Ačkoliv teoretický výzkum zákonitostí mikrosvěta nevyžaduje tak velkou koncentraci lidských a materiálních kapacit, i v teoretické fyzice částic

hrají důležitou roli mezinárodní střediska. Vedle teoretických oddělení laboratoří jako jsou CERN, DESY a FERMILAB sehrálo důležitou roli *Mezinárodní centrum teoretické fyziky v Terstu*, založené v roce 1964 Abdusem Salamem s cílem vytvořit podmínky pro spolupráci teoretiků třetího světa a Východu s kolegy z vyspělých západních zemí. Pro řadu českých teoretiků, především mladých, byl ICTP po více než dvacet let klíčovým místem pro udržení kroku se světem. V Terstu začalo svou vědeckou dráhu také několik dnešních vedoucích osobností našeho ústavu.

.... a u nás

Způsob, jakým je dnes ve světě výzkum v oblasti fyziky částic prováděn, znamená, že efektivně se na něm mohou podílet jen ty laboratoře, které jsou zapojeny do velkých mezinárodních spoluprací. To samo o sobě ovšem nestačí a je třeba mít ještě dvě další věci: kvalitní experimentální zázemí a dostatek studentů. V dalších částech je vylíčeno, jak se naše forma zapojení do mezinárodní vědecké spolupráce postupně vyvíjela a které okamžiky byly z hlediska dnešního stavu klíčové. Jde především o tyto skutečnosti:

- Díky členství v CERN máme široce rozvinuté kontakty s touto vedoucí světovou laboratoří fyziky částic a účastníme se jednoho ze dvou hlavních experimentů připravovaných pro urychlovač LHC. Spolupracujeme také na dvou dalších velkých experimentech v DESY a FERMILAB.
- Disponujeme kvalitní experimentální základnou, zahrnující dobře vybavenou laboratoř polovodičových detektorů, vývojové dílny pro konstrukci kalorimetrů a výpočetní infrastrukturu potřebnou pro zpracování experimentálních dat. Z hlediska celosvětového srovnání patříme v tomto ohledu mezi středně velké laboratoře.
- Již od založení ústavu se všech větších experimentů účastníme v těsné spolupráci s kolegy z MFF UK, od poloviny 80. let v rámci **Společného pracoviště subnukleární fyziky**. S nimi také společně vychováváme studenty. Tato naše dlouholetá spolupráce byla ještě posílena a postavena na kvalitativně nový základ v roce 2000, kdy v soutěži projektů Výzkumných center MŠMT uspělo naše **Centrum částicové fyziky**.

„Křemencárna“, „Boudička“ a Lomnický štít

Předchůdcem dnešní Sekce fyziky elementárních částic byla skupina kosmického záření Fyzikálního ústavu ČSAV, která začala svou výzkumnou práci hned v roce 1953. Pracovala pod vedením **Jaroslava Pernegra** a byla umístěna nejprve ve Fyzikálním ústavu MFF UK na



Obr. 4: „Boudička“ na Karlově a Jan Hladký, dva pamětníci našich začátků.

Karlově, v třetím patře budovy a v dřevěné boudičce na zahradě (obr. 4), později pak v přízemních místnostech domu v Křemencově ulici na Novém Městě. Metoda výzkumu částic a jejich interakcí spočíval v pozorování a měření parametrů drah částic zaznamenaných ve fotografických emulzích ozářených kosmickými paprsky na Lomnickém štítě a v jiných observatořích. V polovině 50. let byly v Praze analyzovány také srážky částic kosmického záření v jaderných emulzích vynesných do stratosféry balonem nad Pádskou nížinou v rámci expedice vedené C. Powellem. V bloku emulze analyzované v Praze byla

nalezena částice s - v té době - největší energií ($\sim 10^{14}$ eV).

Důležitá část těchto emulzí byla proměřována v Praze v těsné spolupráci se skupinou v Krakově. Prohlížení a měření drah částic v emulzích prováděly týmy laborantek na speciálních mikroskopech. Skupina kosmického záření měla při svém založení vědecký kapitál v disertační práci J. Pernegra, věnované měření doby života mionů na emulzích z observatoře na Lomnickém štítě. Lomnický štít se ostatně stal pracovním místem pro celou generaci českých a slovenských experimentálních fyziků. V polovině 50. let J. Pernegr, již jako vedoucí skupiny kosmického záření ve FZÚ, formuloval tzv. *dvoucentrový model* vysokoenergetických srážek protonů, jímž se výrazně zapsal do fyziky elementárních částic v celosvětovém měřítku. Jednalo se vlastně o první model vycházející z pozorované skutečnosti, že většina kolísí při velkých energiích se uskutečňuje jako dvou jetové procesy.

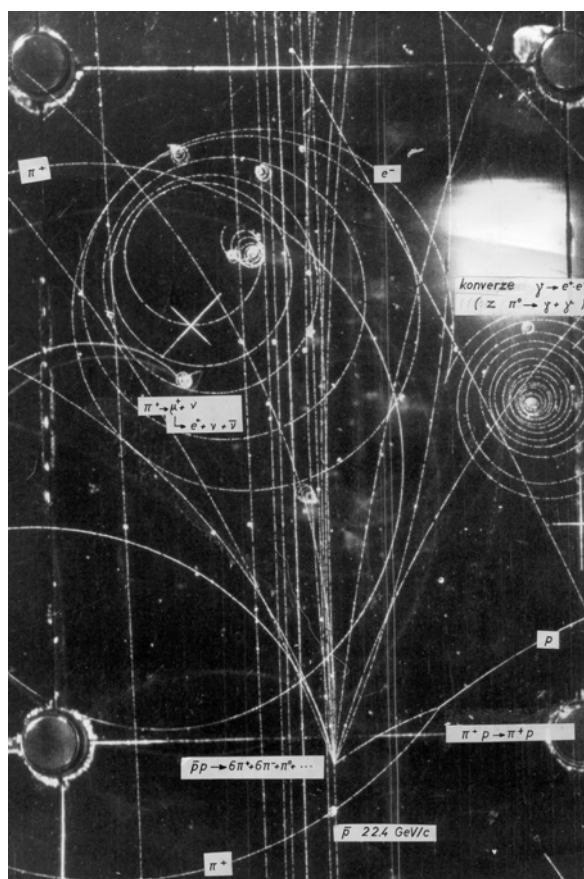
Do Dubny a přes ní i do světa

Od počátku šedesátých let byla po více než dvě desetiletí těžištěm práce fyziků částic z celého tehdejšího Československa účast na experimentech prováděných ve Spojeném ústavu jaderných výzkumů (SÚJV) v Dubně a v Ústavu fyziky vysokých energií Státního výboru pro atomovou energii SSSR v Serpuchově u Moskvy. Týmy z našeho ústavu a dalších českých a slovenských institucí se tam podílely na získávání a vyhodnocování dat z řady experimentů, které měly ve své době vysoký mezinárodní standard. Až do pádu komunismu u nás představoval SÚJV pro většinu českých fyziků částic - kromě emigrace - prakticky jedinou možnost, jak se podílet na špičkových experimentech. Velkou ztrátu pro českou fyziku částic znamenal odchod celé řady experimentátorů i teoretiků, včetně Jaroslava Pernegra, po okupaci v roce 1968. Většina z našich bývalých kolegů se ve světě prosadila a řada z nich nám pomáhala zapojit se do mezinárodních experimentů v CERN, DESY i FERMILAB.

Do poloviny 60. let bylo převažující detekční metodou, jež v té době používala také v CERN, DESY a dalších světových laboratořích, zpracování a analýza snímků z bublinových komor. Z hlediska dalšího vývoje oddělení vysokých energií, jak se až do roku 1990 jmenovala část ústavu zabývající se fyzikou částic, byla nejdůležitější účast v experimentu **LUDMILA** v Serpuchově, kde byl koncem 60. let spuštěn urychlovač protonů s energií 70 GeV. Ten byl po několik let největším na světě a byla na něm dosažena řada důležitých výsledků. Experiment LUDMILA, nazvaný podle stejnojmenné dvoumetrové vodíkové bublinové komory, využíval unikátní svazek antiprotonů o energii 22.4 GeV a jeho cílem bylo studium vysokoenergetických srážek antiprotonů s protony a později antideuteronů s deuterony. Na tomto experimentu se vyučila řada vedoucích osobností české fyziky částic.

Orientace na bublinové komory a fyziku antiprotonů vycházela ze zkušeností skupiny našich pracovníků v podobném experimentu v CERN, kde byl od roku 1968 k dispozici svazek antiprotonů o energii 5.7 GeV, jímž byla ozařována dvoumetrová bublinová komora velmi podobná komoře LUDMILA. Po určitou dobu v naší laboratoři probíhalo zpracování snímků z obou komor paralelně, což nám dávalo možnost využít zkušeností z experimentu v CERN při analýze srážek v experimentu LUDMILA. Při zpracování snímků z obou experimentů se používaly poloautomatické měřicí přístroje **SAMET**, jež byly vyvinuty ve FZÚ. Zpracování prováděly laborantky pod dohledem fyziků. Příklad jedné takové zajímavé srážky je v pravé části obrázku 5. Údaje o drahách nabitých částic se zpracovávaly počítačovými programy převážně na sálových počítačích, jejichž výkon nám dnes připadá úsměvný. Přesto právě touto technikou byl v roce 1973 v CERN pozorován případ pružné srážky neutrina s elektronem, jenž potvrdil správnost klíčového aspektu sjednocení elektromagnetických a slabých sil v rámci SM. Účast v experimentu LUDMILA byla důležitou především tím, že se na tu dobu špičkového experimentu účastnila silná skupina fyziků z FZÚ a MFF UK, takže se

mohly účinně zapojit do řady činností: návrhu experimentu, vývoje software, zpracování dat i přípravě publikací.



Obr. 5. Vyhledávání a proměřování srážek antiprotonů s protony na fotografických snímcích z bublinových komor prováděly naše laborantky na poloautomatických strojích. Na snímku vpravo je případ srážky antiprotonu s protonem, v níž vznikl jeden neutrální a 6 kladně a 6 záporně nabitých pionů.

Od konce 60. let se v celosvětovém měřítku stále více pozornosti obracelo k nové detekční technice, která nebyla založena na fotografických snímcích z bublinových komor, ale na elektronickém snímání informace o drahách elektricky nabitých částic pomocí tzv. dráhových komor. Tyto komory jsou různého typu, ale ve všech vyvolá průlet nabitě částice spršku v citlivém médiu, jež je pak zaregistrována na sběrné elektrodě. Výhoda tohoto způsobu registrace částic je nejen v podstatném zvýšení frekvence registrace částic ale hlavně v možnosti vybírat si zajímavé srážky. Ztráta optické názornosti je v dnešních detektorech více než vyrovnána možností počítačové rekonstrukce drah.

Po zkušenostech elektronického experimentu s aparaturou, která byla téměř celá vyvinuta a vyrobena v našem ústavu a instalována na urychlovači v Dubně, jsme se na urychlovači v Serpuchově podíleli na několika elektronických experimentech (především **BIS a RISK**), které byly důležité z hlediska naší další orientace na tento druh detekční techniky i pro získání zkušeností z vývoje a provozu velkých elektronických aparatur. Z dnešního hlediska se jeví jako klíčová účast velké skupiny fyziků z FZÚ a MFF UK v **experimentu NA4** v CERN v letech 1976-1990. V tehdejší době byla ovšem naše účast možná jen prostřednictvím SÚJV Dubna. V tomto experimentu, který inicioval a řadu let vedl Carlo Rubbia, byly studovány tvrdé srážky mionů s protony a jádry deuteria, dusíku a uhlíku. Svazek mionů o energii 200-280 GeV v CERN byl po desetiletí nejenergetičtější mionovým svazkem na světě a originální koncepce detektoru umožnila nabrat obrovský objem dat. Výsledky experimentu

představují dodnes nejpřesnějšími údaje o struktuře protonu a účast v něm předznamenala naši další orientaci a položila základy naší spolupráce na experimentech v DESY.

Stavíme se na vlastní nohy

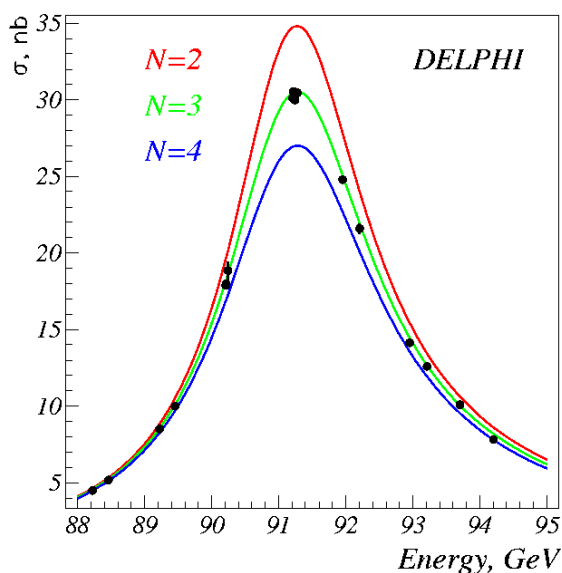
Dnešní stav a zaměření fyziky částic v České republice je do značné míry důsledkem skutečnosti, že ještě před listopadem 1989 se skupinám fyziků z FZÚ a MFF UK podařilo úspěšně a na tu dobu v nebyvalé míře se zapojit do dvou velkých mezinárodních experimentů: **DELPHI** v CERN a **H1** v DESY. Řada vedoucích osobností dnešní fyziky částic v ČR stála u zrodu pražských skupin v těchto dvou experimentech, které byly těžištěm výzkumného programu ve FZÚ i na MFF v druhé polovině 80. a první polovině 90. let.



Experiment DELPHI v CERN byl jedním ze čtyř experimentů na urychlovači LEP. Spolu s kolegy z MFF UK jsme se od poloviny 80. let podíleli na přípravě a chodu tohoto experimentu, nejprve v rámci skupiny DELPHI v SÚJV Dubna a od roku 1992 jako řádné členské laboratoře.

Srážky elektronů s pozitrony představují ideální fyzikální nástroj pro zkoumání vlastností elektromagnetických, slabých i silných sil v rámci SM.

Teoretický aparát SM je natolik dobře zvládnutý, že umožňuje velmi přesné kvantitativní předpovědi, které mohou být následně srovnány s výsledky experimentu. Jedním z hlavních úkolů DELPHI bylo provést právě takovou

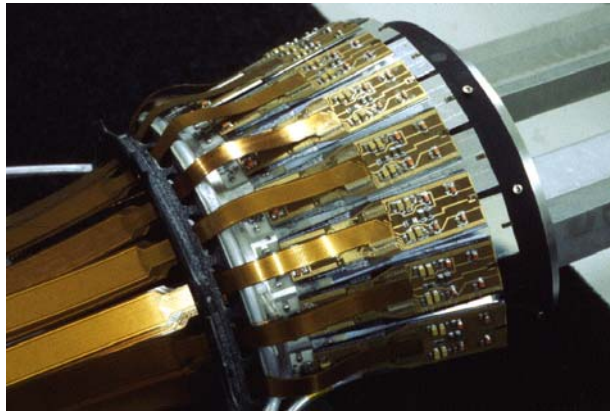


Obr. 6: Závislost účinného průřezu anihilace elektronů s pozitrony na hadrony dokazující, že existují právě jen tři generace fundamentálních fermionů.

prověrku, a to s do té doby nevídanou přesností. Vedle toho si experiment kladl za cíl objevit všechno, co by se standardnímu modelu vymykalo. V první etapě provozu (v letech 1989 až 1995) se na LEP srážely vstříčné svazky elektronů a pozitronů při energii rovné klidové hmotnosti intermediálního vektorového bosonu Z (tedy zhruba 91 GeV). Za takových podmínek prudce vzrůstá počet produkovaných částic. LEP, pracující jako "továrna na Z", umožnil přesně stanovit klidovou hmotnost Z, jeho dobu života a další vlastnosti slabých interakcí. Přesné změření doby života Z vedlo k jednomu z nejzávažnějších výsledků získaných na LEP: ukázalo (viz. obr. 6) se, že **existují právě tři generace základních fermionů!** Kromě jiných důležitých výsledků data z první fáze LEP umožnila studovat i vlastnosti silných interakcí kvarků a gluonů a to prostřednictvím detekce a analýzy **jetů**.

V letech 1996 - 2000 byla energie srážejících se svazků postupně zvyšována až na 208 GeV. Po překročení energie 162 GeV, byla v souladu s teoretickou předpovědí pozorována produkce párů bosonů W^+ a W^- a stanoveny jejich vlastnosti, především klidová hmotnost, jakož i další detaily standardního modelu. I nadále pokračovalo studium silných interakcí a se zvyšující se energií dostalo nový rozměr také hledání „nových“ částic a fyziky za rámcem SM. To samozřejmě probíhalo od samého počátku provozu LEP, jenž představoval pro pátrání po nových částicích ideální nástroj. Při srážkách elektronu s pozitronem může dojít velmi jednoduše k produkci jiných částic. Čím vyšší je energie srážek, tím větší klidovou hmotnost mohou mít vznikající částice. Nebyla však nalezena žádná významná odchylka od předpovědi SM ani žádná nová částice. Tak jak se zvyšovala energie srážek, zvyšovaly se také spodní meze na hmotnosti takových částic. V samotném závěru života urychlovače LEP

se objevily *náznaky produkce Higgsova bosonu* s hmotností okolo 115 GeV, ale statistika pozorovaných případů byly příliš malá na definitivní závěr.



Obr. 7: Pixelový detektor DELPHI vyvinutý ve spolupráci s IHEP ve Vídni

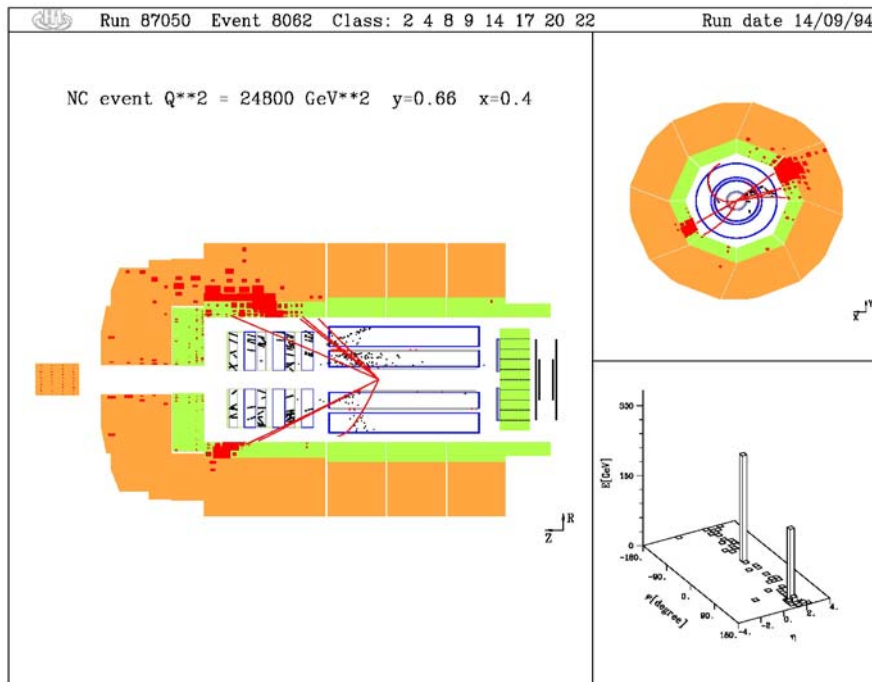
Do experimentu DELPHI jsme přispěli v řadě jeho aspektů. Podíleli jsme se na budování, provozu a zdokonalení hadronového kalorimetru přidáním tzv. katodového vyčítání, zdokonalení elektromagnetického kalorimetru, vývoji a stavbě dopředného subdetektoru VFT, zobrazeného na obr. 7, který výrazně rozšířil akceptanci polovodičového vrcholového detektoru a instalaci vnějších mionových komor. Zcela v pražské režii se uskutečnila stavba, instalace a provoz detektorů pokrývajících "mrtvé úhly" aparatury (tzv. phi-taggerů). Pixelový detektor DELPHI,

kteřý zaujímal plochu cca 0.1 m², byl uveden do provozu v letech 1995-1997 a představuje největší pixelový detektor, který byl vůbec kdy zkonstruován. Podíl na stavbě těchto komponent kráčet ruku v ruce s vývojem potřebného softwaru. Podíleli jsme se také na zabezpečení chodu celého experimentu během nabírání dat a na fyzikální analýze.



Experiment H1 v DESY je jedním ze dvou velkých experimentů na urychlovači HERA v DESY. Jeho hlavním cílem bylo a je studium struktury elementárních částic, především nukleonů. Základní schéma experimentu je stejné, jako to, které kolem roku 1910 použil Rutherford

při svém epochálním objevu atomového jádra. Ten tehdy bombardoval α -částicemi pocházejícími z přirozeného radioaktivního zdroje folie ze zlata a dalších prvků a měřil úhlové rozdělení rozptýlených α -částic. Skutečnost, že pozoroval daleko více případů rozptylu



Obr. 8. Příklad srážky při níž je rozptýlený elektron zaregistrován v elektromagnetickém kalorimetru (zelená část), kde jeho dráha končí a vyrážený kvark se v hadronovém kalorimetru (hnědá část) projevuje jako úhlově kolimovaný svazek částic. V levé části je podélný a v pravé horní příčný řez detektorem. V pravé spodní části je ve formě legoplotu vynesena závislost toku energie na azimutálním a polárním úhlu měřeném vůči směru primárního elektronu. Ačkoliv je jet tvořen mnoha částicemi,

na velké úhly, než odpovídalo tehdejší představám o rozložení náboje v atomu, ho přivedla k hypotéze o existenci malého kladně nabitého jádra uvnitř atomu. V dnešních experimentech zkoumajících strukturu protonů jsou α -částice nahrazeny elektrony, miony a neutrinami, jejichž

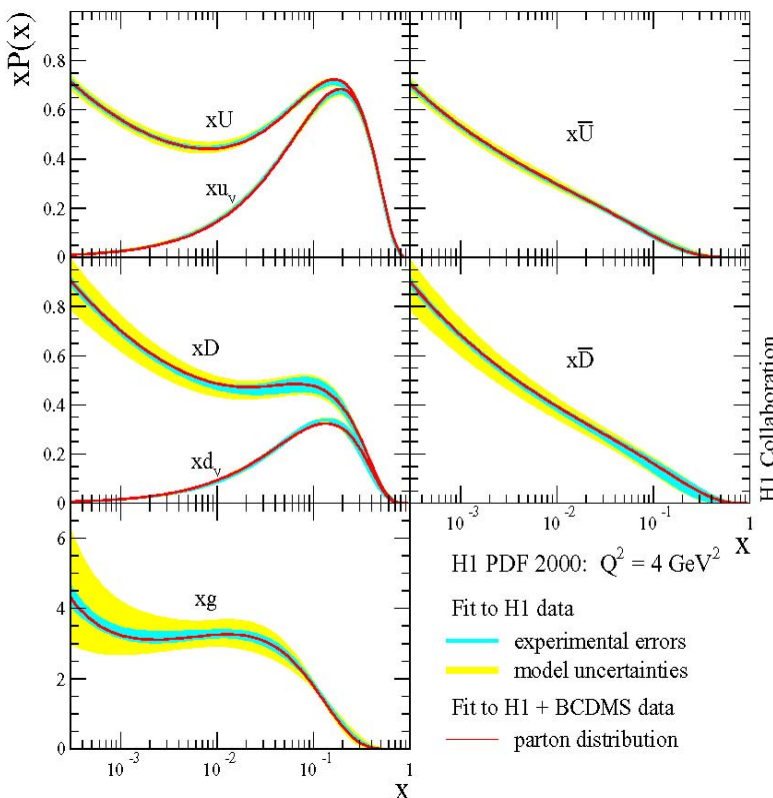
vlastnostem dobře rozumíme. Abychom „viděli“ dovnitř protonu, potřebujeme, aby srážky byly dostatečně „tvrdé“, což vyžaduje dostatečně vysoké energie srážejících se částic.

V experimentu H1 na urychlovači HERA v DESY se srážejí protiběžné svazky elektronů a protonů při celkové těžiškové energii 320 GeV, což umožňuje zkoumat strukturu protonu až na vzdálenostech tisíciný jeho poloměru. Do tohoto experimentu jsme se zapojili jako samostatná laboratoř již v polovině 80. let, v době, kdy byl detektor H1 vyvíjen a konstruován. Naše účast byla důsledkem zkušeností získaných v rámci experimentu NA4 v CERN i skutečnosti, že ještě před listopadem 1989 se podařilo ve FZÚ a na MFF UK vybudovat podmínky pro efektivní zapojení do velké mezinárodní spolupráce.

S ohledem na energetickou asymetrii svazků HERA (protony mají energii 920 GeV a elektrony nebo pozitrony energii 27,6 GeV) je detektor H1 protažen ve směru pohybu protonů. Skládá se z vrcholových křemíkových detektorů, dráhových komor, elektromagnetického a hadronového kalorimetru a mionových detektorů. Rozptýlený elektron je na malých úhlech detektován vláknovým kalorimetrem Spacal.

Detektor H1 měří energetická a úhlová rozdělení produktů srážky - rozptýleného elektronu či pozitronu a produkovaných „jetů“. Počítačová rekonstrukce jednoho takového případu je na obrázku 8. Veličinou, která kvantifikuje "tvrdost" srážky je čtverec předané čtyřhybnosti Q^2 , jenž je vyjádřen pomocí energií E , E' primárního a rozptýleného elektronu a úhlu rozptylu θ vztahem $Q^2 = 2EE'(1 - \cos \theta)$. Čím větší úhel je rozptylu, tím tvrdší je tedy srážka. Základní teoretický rámec pro popis těchto srážek představuje kvark-partonový model. Podle něho se

proton při tvrdé srážce s elektronem chová přibližně jako svazek vzájemně neinteragujících kvarků a gluonů, nesoucích částí jeho energie, jež je označována proměnnou x . Podle současných představ jsou v protonu kromě kvarků i antikvarky a gluony, jež vznikají v důsledku kvantových fluktuací. Čím tvrdší je srážka elektronu s protonem, tím podrobněji můžeme studovat rozložení kvarků a gluonů uvnitř protonu. Cílem měření je určit z rozdělení energie a úhlu rozptýlených elektronů závislost distribučních funkcí kvarků, antikvarků a gluonů na proměnné x . Tato rozdělení, jež představují hlavní veličiny charakterizující strukturu protonu, jsou vynesena na obrázku 9. Všimněme si, že při hodnotách x blízkých k jedné dominují kvarky, zatímco pro malá x gluony. Všechna



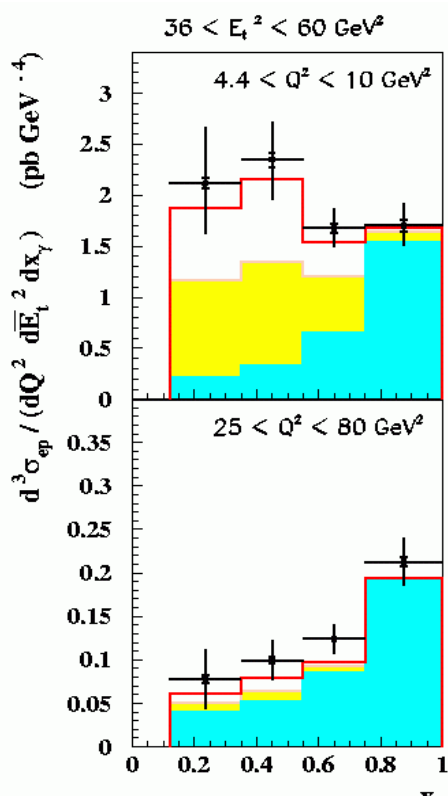
Obr. 9. Distribuční funkce kvarků $U(x)$ a $D(x)$, antikvarků $U(x)$ a $D(x)$ a gluonů $G(x)$ v protonu, získané z analýzy dat experimentů NA4 a H1. Všechny funkce jsou vynásobeny x .

rozdělení prudce rostou pro x blíží se nule. Tento fakt znamená, že proton se nechová jako systém s pevným a konečným počtem konstituentů, jakým je například atomové jádro.

Náš podíl na experimentu H1 má několik stránek. Přispěli jsme především do obou argonových kalorimetrů vývojem a konstrukcí prototypu čtecích elektrod, tvořených deskami pro tištěné obvody o velikosti $0,2 - 1,0 \text{ m}^2$. Elektrody, jejichž celkový počet dosáhl 7000, byly vyrobeny převážně v průmyslu, ale elektrody větších rozměrů přímo ve FZÚ.

Kalorimetry jsou klíčové detektory pro měření charakteristik jetů, o než se výzkum struktury hmoty v dnešní době ve stále větší míře opírá.

Dalším detektorem, na jehož vývoji a konstrukci jsme se podíleli, je elektromagnetický kalorimetr Spacal. Vyrobili jsme podstatnou část modulů kalorimetru, který je tvořen olověnými listy, v jejichž drážkách jsou založena scintilační vlákna o průměru $0,5 \text{ mm}$, která přivádí světlo od záblesků částic do fotonásobiče, a při jeho stavbě jsme byli zodpovědní za monitorování kvality dodávek scintilačních vláken. Kalorimetr má špičkové energetické rozlišení a má klíčový význam pro měření struktury protonu. Podíleli jsme se i na návrhu a výrobě elektronických bloků pro vrcholové křemíkové detektory. Šlo o vícevrstvé tištěné spoje, které obsahují počítačově říditelné napěťové zdroje pro křemíkové senzory a elektronické obvody pro přenos signálů ze senzorů k vyčítacím a spouštěcím obvodům.



Obr. 10. Účinný průřez pro vznik dvou jetů ve srážce elektronu s protonem pro dva intervaly veličiny Q^2 . Modrý plný histogram představuje předpověď teorie bez započtení efektů struktury fotonu, červená čára po jejich započtení.

Z hlediska fyzikální analýzy jsme v rámci kolaborace H1 před několika lety iniciovali výzkum jevů, jež lze interpretovat jako svědectví o struktuře virtuálního fotonu. Zatímco fotony, se kterými se setkáváme ve formě elektromagnetického záření, jsou reálné, při rozptylu elektronů na protonech je jejich vzájemné působení zprostředkováno „výměnou“ virtuálních fotonů. Virtuální foton je kvantově mechanický objekt, jehož doba života je nepřímo úměrná hodnotě veličiny Q . Po dobu svého života může (ale nemusí) virtuální foton fluktuovat do páru kvark-antikvark a ty na sebe dále působit silnými silami. Výsledek tohoto poměrně složitě kvantově polního efektu lze přibližně popsat pomocí pojmu „struktura fotonu“ a zavést distribuční funkce kvarků a gluonů virtuálního fotonu podobně jako u protonu. Struktura virtuálního fotonu lze zkoumat měřením koncových stavů srážek elektronu s protonem, v nichž vznikají jety. Velikost vhodná pro posouzení skutečnosti, zda foton interagoval jako celek, nebo prostřednictvím jeho kvarků či gluonů, je v dalším označovaná jako x_γ a lze jí určit měřením hybností produkovaných jetů. Pokud interagoval foton jako celek, je $x_\gamma = 1$, zatímco pokud interagovaly partony z něj, platí $x_\gamma < 1$. Výsledek měření je uveden na obr. 10 pro dva intervaly Q^2 . Horní obrázek zobrazuje účinný průřez srážky virtuálního fotonu s protonem pro malé hodnoty Q^2 . Měření potvrzují představu, že vzhledem k dlouhé době života se takový

virtuální foton nachází ve stavu kvantové fluktuace častěji, než na spodním obrázku, v němž je Q^2 mnohem větší. Barevné plochy a křivky udávají teoretickou předpověď pro případ, že foton interaguje jako celek (modrá plocha) nebo se interakce účastní jeho partony (sjednocení

žluté a bílé plochy). Součet tří příspěvků reprezentovaný červenou čarou je v dobré shodě s měřením.

Osudové rozhodnutí

Během dvou let po listopadu 1989 došlo, tehdy ještě v rámci Československa, k zásadnímu přeorientování české a slovenské fyziky částic. Místo pokračování spolupráce na velkých mezinárodních experimentech prostřednictvím členství v SÚJV Dubna se neformální shromáždění českých a slovenských fyziků v létě 1991 v Liblicích rozhodlo zaměřit naše další snahy na co nejrychlejší získání členství v CERN a na přímé zapojení českých a slovenských laboratoří do experimentů v CERN a jinde. Toto rozhodnutí nebylo snadné, neboť členství v SÚJV nám poskytovalo jisté zázemí, které jsme si doma teprve museli vybudovat, ale na druhé straně nám umožnilo realizovat své vlastní představy a stát se skutečně svébytnými partnery vyspělých laboratoří.

Do CERN jsme byli přijati dvakrát: 1. ledna 1992 ještě jako ČSFR a po rozpadu federace znovu jako Česká republika 1. 7. 1993. Experimentální výzkum využívající urychlovače v CERN představuje těžiště našeho současného programu a účast v experimentu ATLAS na urychlovači LHC v CERN bude jeho osou nejméně po další desetiletí.

Při přijímání nejdříve ČSFR a pak znovu ČR bylo podstatné, že počátkem 90. let byly české a slovenské laboratoře účastníky několika v té době probíhajících experimentů. Velký význam měla z tohoto hlediska naše účast v experimentu DELPHI, o níž jsme se již zmínili. Svou roli ovšem sehrála i skutečnost, že kromě DELPHI jsme se počátkem 90. let podíleli ještě na dvou dalších experimentech v CERN: **UA2 a UA4/2**. Do prvního z nich, jenž zkoumal tvrdé srážky antiprotonů s protony při těžišťové energii 630 GeV, byly zapojeni dva fyzikové, kteří se v rámci skupiny v CERN soustředili na fyzikální analýzu dat, především hledání top kvarku. Na experimentu UA4/2, který byl zaměřen na přesné měření základních charakteristik pružného rozptylu antiprotonu na protonu při energii 541 GeV, jsme se podíleli již jako jedna z šesti účastnických laboratoří. Do tohoto experimentu jsme dodali scintilační detektory pro měření intenzity srážejících se svazků, které byly pro měření klíčové, a byli jsme také za jejich provoz po celou dobu experimentu (tj. zhruba dva roky) odpovědní. Dále jsme se podíleli na zpracování dat a jejich interpretaci.

Základní orientace na CERN ovšem neznamená, že se nepodílíme i na experimentech v dalších světových laboratořích. Současné zapojení do více experimentů je nezbytné především proto, že doba přípravy, konstrukce a provozu moderních experimentů je typicky 20 i více let. Pro výchovu mladé generace je pak důležité, aby měla možnost vyučit se na experimentech v různých stádiích.

Současný stav: naše hlavní aktivity

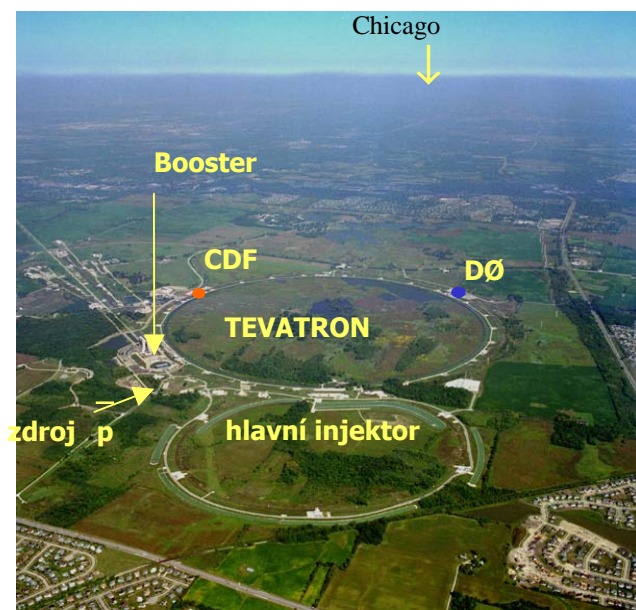
Těžiště našeho výzkumného programu je vedle pokračujícího experimentu **H1** v DESY, o němž jsme se již podrobně zmínili, v účasti na experimentech **D0** ve FERMILAB a **ATLAS** v CERN a účasti na mezinárodním projektu **Observatoř Pierra Augera**. Experimentální základnu pro tento výzkum zajišťuje laboratoř polovodičových detektorů a pro posledně jmenovaný projekt také Společná laboratoř optiky FZÚ a UP v Olomouci.

Kromě těchto experimentů, jichž se účastní velké týmy, čítající 10 až 20 fyziků, inženýrů a techniků, jsme v menší míře zapojeni i do dvou dalších experimentů v CERN: **DIRAC a NA57**. Cílem prvního z nich je změření doby života pionia - atomu tvořeného dvěma opačně nabitými piony. Tato doba, která je přibližně 3 femtosekundu, závisí na chování silných sil na vzdálenostech asi tisícinu milimetru, kde nelze použít poruchovou QCD a je nutno použít neporuchové metody efektivních lagranžianů. Studium pionia tak i nepřímou umožňuje lepší

pochopení silných sil. Druhý experiment je zaměřen na hledání příznaků kvark-gluonového plazmatu, stavu v němž se vyskytovala hmota v několika málo okamžicích po Velkém třesku. Srážkami těžkých jader urychlených na vysoké energie se snažíme tento stav hmoty v malém zopakovat a přispět tak k pochopení vzniku našeho vesmíru. V obou případech se podílíme převážně na fyzikální analýze dat a provozu detektorů. Nedílnou součástí našeho programu je také všestranně zaměřený **teoretický výzkum** a řadu let se věnujeme i velmi důležité otázce **využití svazků částic v lékařství**



Experiment D0 je jeden ze dvou velkých experimentů na urychlovači TEVATRON v americké laboratoři FERMILAB (obr. 11). Ve spolupráci s partnery z MFF UK se na něm podílíme od roku 1996.



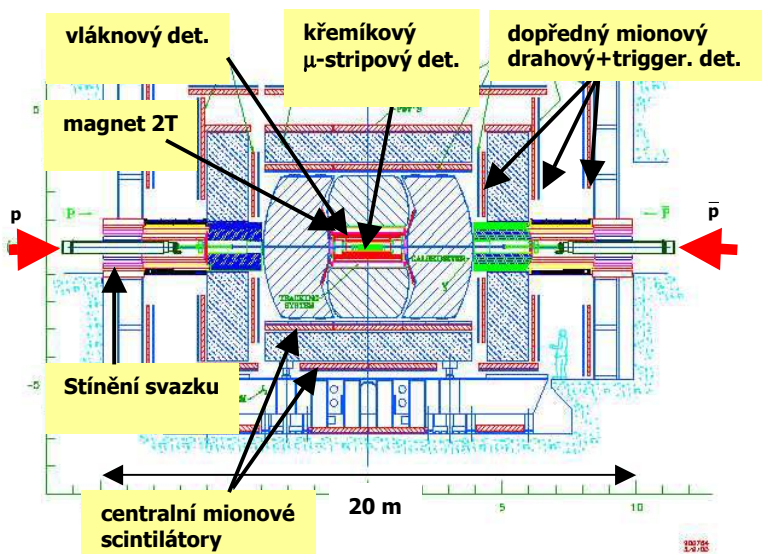
Obr. 11: umístění detektoru D0 v urychlovacím komplexu FERMILAB.

Detektor D0, znázorněný na obr.12, je univerzální detektor pro měření produktů srážek protiběžných svazků protonů a antiprotonů, k nimž dochází uprostřed detektoru. Vzniklé produkty procházejí nejdříve křemíkovým mikrostripovým dráhovým detektorem a dráhovým detektorem ze scintilačních vláken, jež jsou uvnitř válcového supravodivého magnetu o intenzitě 2T. Za ním následuje uranový kalorimetr s kapalným argonem. Kolem kalorimetru jsou umístěny vrstvy mionových komor. Spouštění detektoru je realizováno pomocí systému třech úrovní. Objem surových dat jednoho případu je cca 200 kB, nepřetržitý datový tok pro záznam případů je na úrovni 10 MB/s. Po

rekonstrukci dat je prováděna fyzikální analýza, pro kterou je třeba počítačově

simulovat odezvu detektoru na případy srážek generovaných podle teoretických představ. Experiment ročně produkuje celkem asi 10^{15} (PB) bajtů dat, jejichž zpracování probíhá na

farmách spolupracujících laboratoří, včetně FZÚ.



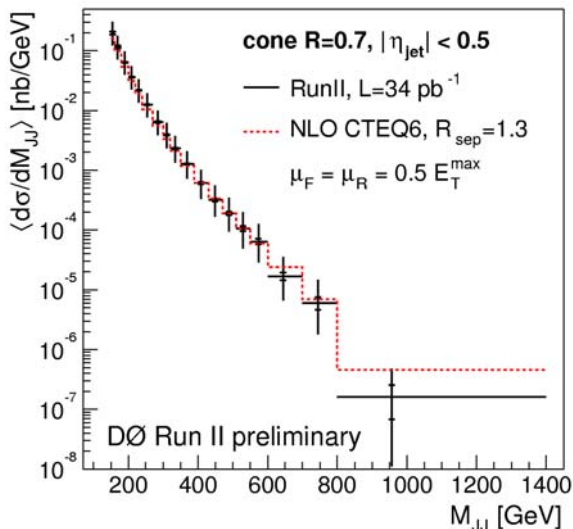
Obr. 12: Schematický průřez detektorem D0.

Při modernizaci detektoru, jež proběhla v letech 1997-2001, byl mimo jiné přidán supravodivý magnet, křemíkový vrcholový detektor, protonový detektor pro měření rozptylu na malé úhly a doplněn mionový systém a nová elektronika pro zrychlení sběru dat. Podíleli jsme na vývoji a konstrukci mikrostripového křemíkového detektoru, výrobě a instalaci mionového detektoru a dopředného detektoru.

Fyzikální program experimentu D0 je zaměřen na hledání

odpovědí na několik okruhů otázek:

- **Vlastnosti top kvarku.** Top kvark je nejtěžší známý kvark a přesné stanovení jeho vlastností, především hmotnosti a doby života, je velmi důležité pro prověrku SM.
- **Hledání projevů supersymetrie.** Experiment D0 má šanci objevit supersymetrické partnery částic SM, pokud jejich hmotnostmi nepřesáhnou 500 GeV.
- **Hledání Higgsova bosonu.** Experiment D0 má šanci pozorovat Higgsův boson s hmotností v intervalu 115 – 180 GeV.



Obr.13: Účinný průřez inkluzivní produkce dvojic jetů v závislosti na jejich invariantní hmotnosti.

doktorandů, je na obr. 13. TEVATRON bude až do spuštění urychlovače LHC v CERN jedním z nejdůležitějších center výzkumu v oblasti fyziky mikrosvěta a účast v něm je nejlepší přípravou na experimenty na LHC.

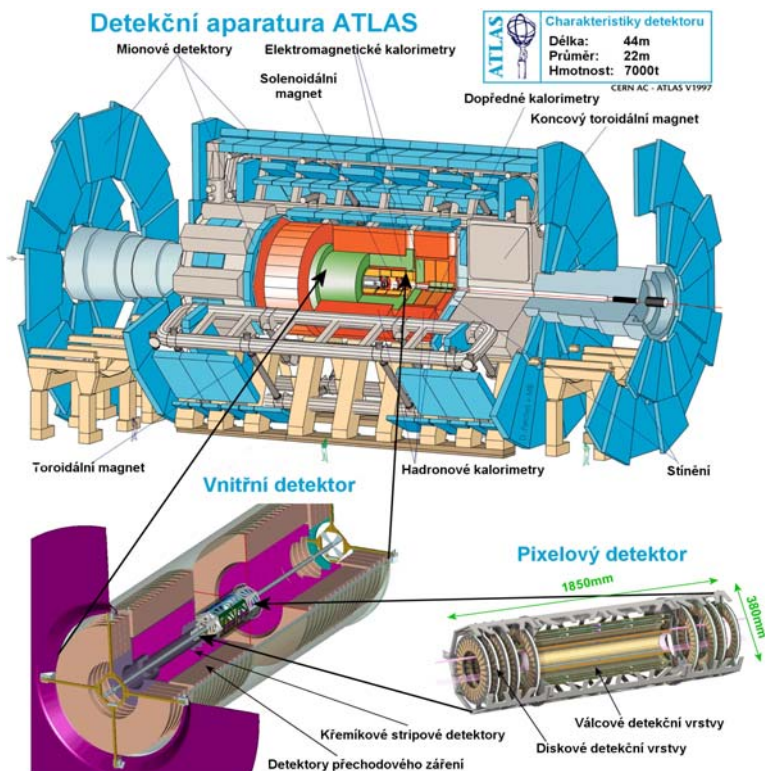


Experiment ATLAS na urychlovači LHC v CERN je svou důležitostí a rozsahem největším projektem fyziky částic v ČR.

Detektor ATLAS, jehož schéma je zachyceno na obr. 14, je univerzální detektor produktů srážek vstřícných svazků. 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 rozlétají na všechny strany (viz schéma na obrázku 1).

Nejdříve procházejí vnitřním detektorem, umístěným v poli supravodivého magnetu o intenzitě 2T, který zakřivuje dráhy nabitých částic 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 toroidními magnety o délce 26 m s polem 2 T, které měří dráhy mionů po průchodu hadronovým kalorimetrem. Detektor je spouštěn každých 25 ns, tj. a elektronický systém tří úrovní vybírá zvolené zajímavé případy, jež se zapisují na vnější magnetická média s frekvencí 100 Hz. Při objemu dat 1.6 MB na zaznamenávaný případ je očekáván celkový tok dat 160 MB/s. Celkově bude experiment ATLAS produkovat ročně asi 7 PB dat. Pro přístup k tomuto ohromnému množství dat a pro jeho zpracování a zpřístupnění se očekává pomoc od projektů výpočetních a datových gridů, zvláště pak od **projektu LCG** (LHC Computing Grid), jehož programem je

realizace nových metod pro zpracování dat všech experimentů na LHC. Budují se regionální výpočetní centra, která budou využívat všichni spolupracovníci experimentu. Jedno z nich bude i u nás ve FZÚ.



Obr. 14: Schéma detektoru ATLAS s umístěním centrálního dráhového detektoru.

Fyzikální program

experimentu ATLAS, na němž spolupracuje okolo 2000 fyziků ze 150 institucí z 34 zemí světa je velmi široký a jeho hlavní body lze shrnout takto:

- **Hledání Higgsova bosonu.** Pokud tato částice existuje, ATLAS ji bude schopen detektovat až do hmotnosti 1000 GeV. Pokud je jeho hmotnost okolo 120 GeV, jak naznačovala data ze závěrečné etapy LEP, měl by být objeven již během prvního roku provozu LHC.
- **Hledání substruktury kvarků a leptonů.** Dosud neexistuje žádný náznak, že kvarky či leptony jsou složeny z elementárnějších objektů, ale tuto možnost nelze vyloučit.
- **Hledání projevů supersymetrie.** Experiment ATLAS bude mít schopnost objevit supersymetrické částice až do hmotnosti kolem 1000 GeV a rozhodnout tak, zda tato pozoruhodná teoretická myšlenka je správná.
- **Hledání projevů teorií sjednocení** elektroslabých a silných interakcí. O takové sjednocení se snaží řada modelů, ale klíčovou roli při „nasměrování“ teorie bude mít experiment.



Obr.15: Testovací sestavení hadronového kalorimetru TILECAL v pozemní hale v CERN.

- **Hledání projevů dalších dimenzí** jež vystupují ve všech teoriích strun. V poslední době se objevily spekulace, že tyto další dimenze by mohly mít pozorovatelné důsledky již pro srážky protonů s protony na urychlovači LHC.

Na experimentu ATLAS spolupracuje v ČR na 60 fyziků, studentů, inženýrů a techniků z FZÚ, MFF UK a několika fakult ČVUT, kteří se podíleli na přípravě projektu detektoru a jeho součástí, především kalorimetrů a křemíkového detektoru. FZÚ je ve spolupráci s MFF UK

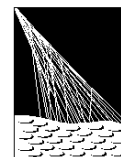
zodpovědný za vývoj a výrobu části **hadronového kalorimetru TILECAL** a příslušných speciálních vysokonapěťových zdrojů a vývoj a testování **pixelových a stripových detektorů**. Podílíme se i na vývoji software a fyzikálním programu.

Hadronový kalorimetr TILECAL měří energii jetů. Jako pasivní materiál používá válcovanou ocel a jako aktivní materiál plastické scintilátory. Kolaborace ATLAS zakoupila v ČR ve Válcovnách za studena v Králově Dvoře tři tisíce tun oceli pro výrobu celého kalorimetru. Z části oceli bylo ve FZÚ vyrobeno během tří let 309 jednotunových částí detektoru. V ČR bylo dále vyrobeno 11 tis. kusů směšovačů světla pro optickou část kalorimetru. Ve FZÚ byly vyvinuty a ve spolupráci s TESLA Hloubětín vyrobeny vysokonapěťové zdroje pro 10 tisíc fotonásobičů. Mechanické části kalorimetru jsou vyrobeny a nyní probíhá testovací sestavení celého kalorimetru v pozemní hale v CERN (obr. 15).

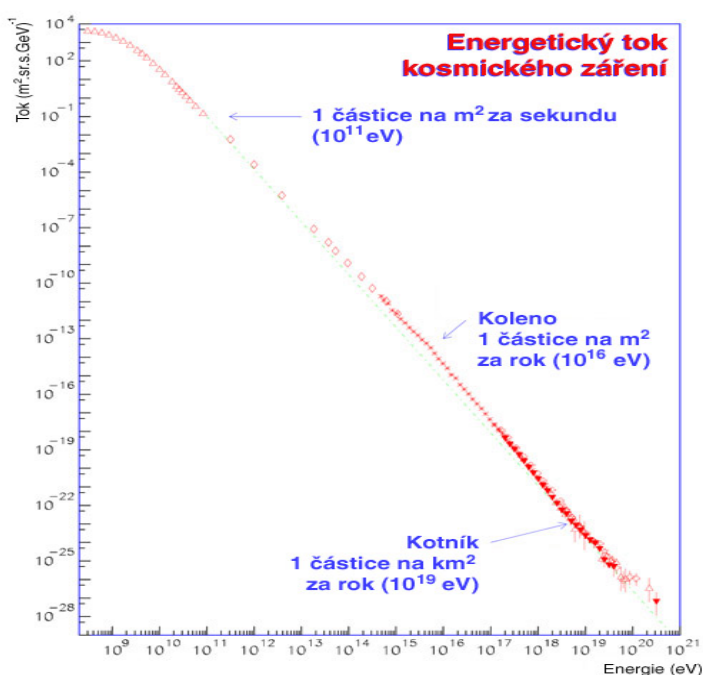
Vnitřní detektor měří dráhy nabitých částic v blízkosti vrcholu srážky s přesností 20 μm pomocí stripových a pixelových křemíkových detektorů. Část křemíkových pixelových detektorů byla vyrobena v TESLA Sezam v Rožnově. Naše laboratoř kontroluje kvalitu čtvrtiny vyrobených detekčních modulů a je zodpovědná za kvalitu testování stripových detektorů ve všech laboratořích. Pro stripové detektory jsme vyvinuli speciální napěťové zdroje, které budou vyrobeny v ČR.

Kromě stavby detektoru se aktivně podílíme na výstavbě výpočetní infrastruktury, přípravě fyzikálního programu a vývoji software. Pro počítačové simulace činnosti detektoru využíváme výpočetní farmu Goliáš a připravujeme novou výpočetní infrastrukturu ve spolupráci s projektem DataGrid a LCG. Při přípravě fyzikálního programu se věnujeme analýze měřitelnosti řady konkrétních procesů a veličin: hmoty top kvarku, spinových korelací při produkci párů top kvarků, produkci Higgsova bosonu a bosonů W a Z.

Observatoř Pierra Augera. Kosmické záření se ve Fyzikálním ústavu studovalo od jeho založení. V současné době je v popředí zájmu fyziků částic mezinárodní projekt **Observatoř Pierra Augera** (OPA), jehož hlavním cílem je zjistit zdroj a podstatu kosmického záření extrémně vysokých energií. Právě



**PIERRE
AUGER
OBSERVATORY**



Obr. 16: Energetické spektrum kosmického záření.

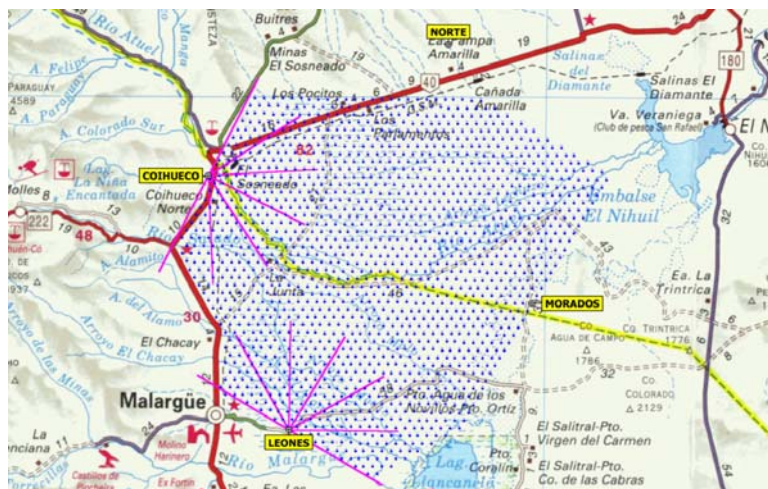
tato oblast s energiemi vyššími než 10^{19} eV dosud postrádá jak solidní základnu dat, tak obecně přijímanou teorii vysvětlující jeho vznik a podstatu. Základním problémem je skutečnost, že na povrch Země dopadne na 1 čtvereční kilometr za 100 let zhruba jen jedna částice s energií 10^{20} eV a vyšší. Celkem bylo od roku 1959 zaznamenáno jen asi 20 případů s tak vysokými energiemi. Experimentálně bylo zjištěno, že tok částic kosmického záření rychle klesá s jejich energií E zhruba jako $1/E^{2.7}$ (obr. 16). Kolem energie 10^{16} eV je na křivce znázorňující energetické spektrum patrné tzv. „koleno“ a kolem energií

spektra 10^{19} eV tzv. „kotník“. V oblasti extrémně vysokých se v příkrém rozporu s teoretickým očekáváním pozoruje opět závislost typu $1/E^{2.7}$. Pro energie nad $5 \cdot 10^{19}$ eV by podle Greisena, Zacepina a Kuzmina mělo spektrum v podstatě končit v důsledku vlivu srážek částic kosmického záření s mikrovlnným reliktním zářením. Díky tomuto efektu k nám ze vzdáleností větších než 100 Megaparseků (Mpc) nedoletí žádné částice s energií vyšší než zhruba 10^{20} eV. Ve vzdálenostech bližších než 100 Mpc zase neznáme žádné vhodné astrofyzikální zdroje takto extrémně energetického záření.

Tato neshoda teoretické předpovědi a pozorování vyvolává řadu otázek, které se týkají jak základů částicové fyziky, tak astrofyziky. V kosmickém záření s tak extrémními energiemi by se již neměly nacházet žádné fotony či elektrony, mělo by být tvořeno zejména protony, popř. těžšími atomovými jádry. Ale nejsou původci těch nejenergetičtějších spršek například neutrina, která srážkami s reliktním zářením netrpí? My ovšem neznáme žádné vhodné objekty ve vesmíru, které by byly schopny dodat neutrinům tak vysoké energie. Anebo je chyba v našich modelech srážek? K odpovědím by nás měla přiblížit právě budovaná OPA.

Observatoř bude měřit parametry spršek kosmického záření vznikajících po srážkách s molekulami v horních vrstvách atmosféry. Kosmické záření může být z povrchu Země pozorováno nepřímo prostřednictvím spršek částic produkovaných v atmosféře. Studium těchto atmosférických spršek lze určit parametry původní primární částice (tj. její energii, směr dopadu a typ částice). Množství částic ve spršce, které dopadnou na zem, je totiž úměrné počáteční energii primární částice. Velikost zasažené plochy také odpovídá energii primární částice a rovněž závisí na tom, v jaké výšce došlo k první interakci. Tato výška, zastoupení různých druhů částic ve spršce a její tvar vypovídají také o typu primární částice. Nabitě částice spršky při průletu zemskou atmosférou excitují molekuly dusíku. Ty pak při deexcitaci vydávají fluorescenční záření. I v tomto případě je množství nabitých částic ve spršce a tedy i množství fluorescenčního světla úměrné energii primární částice. V obou případech přesnost měření závisí na tom, jak dobře jsme schopni popsat rozvoj spršky. Všechny dosud detektované částice s rekordními energiemi byly zaznamenány v experimentech, které používaly buď pouze fluorescenční metodu, nebo jenom síť pozemních detektorů. Protože tyto techniky jsou založeny na různých fyzikálních dějích, které probíhají při rozvoji spršky, a závisí tedy také na naší znalosti těchto jevů, výsledky obou typů experimentů se poněkud liší.

V rámci OPA budou poprvé použity obě techniky současně. Jako pozemní detektory budou použity nádrže s čistou vodou. Sprška vyvolaná částicí s energií nad 10^{19} eV zasáhne při dopadu na zemský povrch plochu několika čtverečních km. Částice, které projdou nádobami



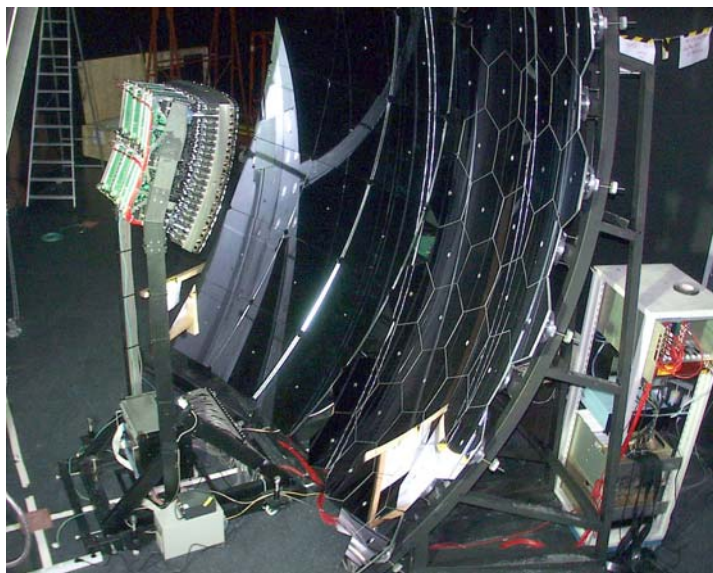
Obr. 17 Rozložení detektorů OPA v Argentině. Modré body představují 1600 povrchových detektorů, žluté rámečky umístění stanic fluorescenčních detektorů.

vyzáří při průchodu vodou Čerenkovovo záření, jež bude registrováno pomocí tří fotonásobičů umístěných v každé nádobě. Komunikace mezi jednotlivými pozemními detektory, fluorescenčními detektory a řídicím centrem probíhá pomocí radiového spojení. Zatímco pozemní detektory mohou sledovat kosmické záření 24 hodin denně, fluorescenční detektory mohou měřit pouze za jasných bezměsíčných nocí. Celkem asi 10 % všech případů bude

měřeno oběma způsoby.

OPA bude tvořena dvěma základnami: na severní polokouli v Utahu v USA, na jižní v oblasti Malargüe v provincii Mendoza v Argentině. Jako první je v letech 2001 – 2005 budována jižní základna v Argentině. Obě základny budou tvořeny sítí 1600 detektorů, přičemž jednotlivé detektory budou od sebe vzdáleny 1,5 km a celkově tak pokryjí plochu 3000 km² – čili plochu třicetkrát větší než je plocha současného největšího detektoru (viz. obr 17). Sít' pozemních detektorů bude na hranicích území doplněna o čtyři stanice s vysoce citlivými fluorescenčními teleskopy vybavenými maticemi fotonásobičů. Sít' 40 pozemních detektorů a dvou fluorescenčních teleskopů již v Argentině funguje od poloviny roku 2001, v loňském roce se již podařilo zaznamenat několik případů s energiemi nad 10¹⁹ eV.

Projektu OPA se účastní přibližně 250 vědců z více než 30 institucí z 19 zemí světa. My jsme se do něho zapojili v roce 1997. Každá z členských zemí přispívá k výstavbě observatoře, naším hlavním příspěvkem je výroba 12 zrcadel pro fluorescenční detektor, každé s plochou zhruba 12 m². Zrcadla tak velkých rozměrů nelze vyrobit jednoduše v celku, proto se skládají z 60 menších šestiúhelníkových segmentů, zachycených na obr. 18. Vývoj segmentů a



Obr.18 Zrcadla pro Observatoř Pierra Augera vyrobená v SLO.

výpočty optického systému fluorescenčních detektorů se uskutečnily ve Společné laboratoři optiky (SLO) FZÚ a Univerzity Palackého v Olomouci. Od roku 2001 v této laboratoři probíhá také výroba zrcadel. V současné době je vyrobena polovina všech segmentů, které postačují k montáži šesti zrcadel. Části zrcadel pro první dva teleskopy byly loni v červnu odeslány do Argentiny. Podílíme se i na stavbě pozemní části detektoru pořízením 300 fotonásobičů pro čerenkovské detektory.

Kromě výstavby fluorescenčního detektoru se věnujeme zpracování a

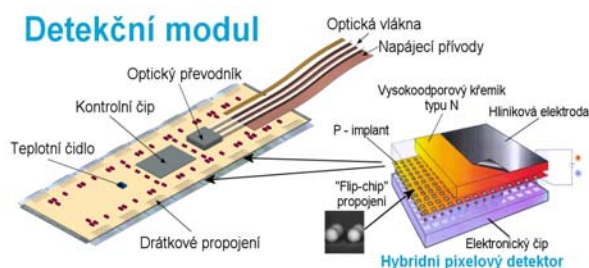
analýze dat, které produkuje funkční prototyp detektoru v Argentině. Vyvinuli jsme software pro geometrickou rekonstrukci spršek z fluorescenčního detektoru a navrhli metody pro analýzu pozadí, které je automaticky nabíráno při provozu fluorescenčního detektoru a které lze využít pro kalibraci pozic jednotlivých detekčních fotonásobičů a jejich absolutního zisku.

Laboratoř polovodičových detektorů. Přesné souřadnicové detektory tvoří páteř moderní aparatury pro experimenty ve fyzice částic. Dominantní postavení v této oblasti zaujímají různé varianty polovodičových detektorů. Naše laboratoř se podílí několika mezinárodních projektech.

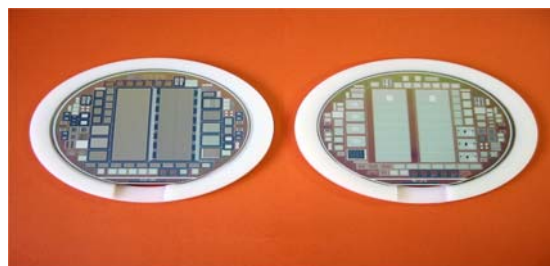
Pixelové detektory pro ATLAS. Součástí subdetektoru SCT (Silicon Central Tracker) experimentu ATLAS je pixelový detektor, který je tvořen válcovými plochami a disky obepínajícími urychlovačovou trubici v bezprostřední blízkosti místa srážky primárních částic. Detekční čidla - pixely - o rozměrech 50x400 μm² pokrývají plochu okolo 2 m² a představují více než 100 milionů kanálů. Pixelové detektory slouží k přesnému určení místa rozpadu krátce žijících částic.

Vzhledem k tomu, že na LHC dojde během každých 25 nanosekund k více než 20 srážkám primárních částic, musí být detekční systém schopen během jedné vteřiny vyhodnotit informaci o více než deseti miliardách nabitých částic. V případě pixelových detektorů jde o velmi kompaktní zařízení vyrobené špičkovými technologiemi zaručujícími jeho dlouhodobou funkčnost a vysokou spolehlivost po dobu deseti let provozu na LHC.

V rámci široké mezinárodní spolupráce jsme se podíleli na vývoji sensorové části pixelových detektorů pro experiment ATLAS, znázorněných na obr. 19-20. Ve spolupráci s **TESLA Sezam**, byly vyrobeny ověřovací prototypy a TESLA Sezam se stala jedním ze dvou dodavatelů technologicky velmi náročných pixelových senzorů pro tento experiment.



Obr. 19: Detekční modul detektoru ATLAS



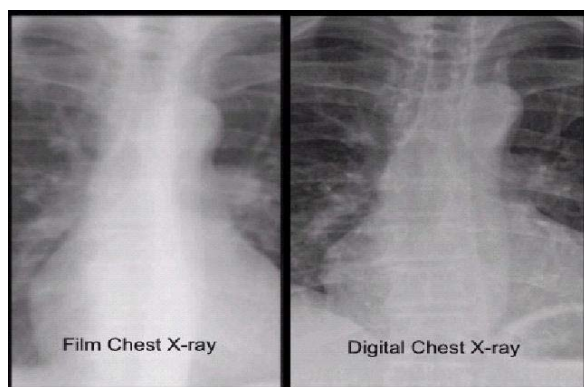
Obr.20: Pixelové detektory vyrobené v TESLA Sezam

Účast v projektu pixelových detektorů ATLAS navazuje na naši účast při vývoji pixelového detektoru experimentu DELPHI. Ve srovnání s DELPHI se koncepce pixelových detektorů ATLAS ovšem významně liší. Důvodem je potřeba, aby detektory byly funkční i po radiační dávce 50 MRad, kterou obdrží během deseti let provozu. Z tohoto důvodu se s použitím dvoustranné litografie vytvářejí odpovídající detekční struktury na obou stranách křemíkové desky (obr. 17). Základní stavební jednotkou pixelového detektoru je modul, který obsahuje 46 tisíc pixelů. Vysoká hustota detekčních čidel vyžaduje speciální techniku kontaktování ke čtecí elektronice, která používá cínové nebo indiové kuličky o průměru 15 μm . Křemíkové detektory experimentu ATLAS zauímají celkově plochu téměř 80 m^2 .

Kalorimetrie pro budoucí experimenty. Důraz na včasnost zapojení do mezinárodních projektů dokumentuje naše účast v projektech **Evropského výboru pro budoucí urychlovače** (ECFA). Společně s kolegy z MFF UK se podílíme na vývoji nové generace kalorimetrů. Tyto kalorimetry se vyznačují kompaktností a vysokou granularitou umožňující detailnější rekonstrukci srážek a tím jejich přesnější fyzikální interpretaci.

Elektromagnetický kalorimetr je tvořen vrstvami 1.4 mm tlustých wolframových destiček a 500 μm tlustých křemíkových senzorů členěných do padů o velikosti 1x1 cm^2 . V rámci mezinárodního programu **Calice** (Calorimetry for Linear Collider of Electrons) jsme odpovědni za koncepci křemíkových senzorů a jejich výrobu pro prototyp kalorimetru. Původní koncepce hadronového kalorimetru Calice, jehož „sampling“ je tvořen dlaždicemi železa a plastického scintilátoru, se podstatně změnila, a to i díky našemu příspěvku. Tato změna je dána použitím APD (Avalanche Photo Diode), případně křemíkových fotodetektorů místo klasických fotonásobičů. Jde o elegantní, kompaktní a spolehlivé řešení, které je perspektivně též lacinější. V rámci Calice jsme odpovědni za testování APD.

Aplikační výstupy – projekt MEDIPIX. Značná část postupů a materiálů vyvíjených pro detektory ve fyzice částic představuje špičku v současných technologiích. Tato detekční technika může mít ovšem řadu praktických aplikací v medicíně, biologii, materiálovém výzkumu, ekologii atp. Na aplikační využití pixelových detektorů je zaměřen mezinárodní projekt **MEDIPIX**. Ve spolupráci s CERN a **NIKHEF** Amsterdam se podílíme zejména na testování jednotlivých uzlů aparatury. Příklad rentgenové vizualizace biologických preparátů pomocí detektoru **MEDIPIX** je na obr. 21. Ve srovnání s klasickou rentgenoskopií se



Obr. 21: Rentgenový obrazu hrudi fotografickou cestou (vlevo) a pomocí detektoru MEDIPIX (vpravo).

používají menší ozařovací dávky a nosičem informace není fotografická deska, ale paměť počítače. Tato technika umožňuje trojrozměrné vyšetření biologického preparátu "on-line". Pro tento projekt plánujeme výrobu senzorů v TESLA Sezam.

Teorie. Teoretický výzkum byl od založení ústavu orientován na širokou paletu problémů, od přímé účasti na analýze experimentálních dat až po rozvoj matematických metod potřebných pro formulace myšlenek o základních vlastnostech prostoru a času.

Přímá spolupráce na experimentech.

je jedním z určujících znaků našeho vědeckého programu. V současné době se přímo podílíme na experimentech **H1** v DESY a **D0** ve Fermilab, v minulosti se aktivně účastnili také experimentů **DELPHI** a **UA4/2** v CERN. Přímá účast fenomenologicky orientovaných teoretiků na experimentech je nezbytností, neboť kvalitní fyzikální analýza experimentálních dat vyžaduje využití teoretických výsledků „šitých na míru“ konkrétnímu experimentu. A také naopak, jedině důvěrná znalost způsobu, jak se zpracovávají experimentální data, dává teoretikovi správnou představu o tom, co a jak lze dnes experimentálně změřit. Vyváženost pracovních skupin jednotlivých experimentů z hlediska zastoupení teoretiků je naším cílem a v případě experimentu H1 a částečně i D0 je již dnes skutečností.

Symetrie mikrosvěta.

hrají ve fyzice částic klíčovou roli. Znalost symetrie fyzikálního systému umožňuje klasifikovat fyzikální objekty, určuje zákony zachování, pomáhá při řešení rovnic dané teorie a v neposlední řadě je i nástrojem při formulaci samotných těchto rovnic, tj. při hledání matematického popisu fyzikálních zákonů.

Hlavním cílem našeho výzkumu v této oblasti je budování **teorie sjednocující všechny známé síly** působící mezi kvarky a leptony. Nejdůležitější výsledky získané v této oblasti ve FZU se týkají využití **myšlenky supersymetrie** při formulaci jednotné teorie sil zahrnující i gravitační sílu, jež ve standardním modelu stojí poněkud v pozadí.

Teorie strun.

V poslední době došlo v teoretické fyzice částic k bouřlivému rozvoji souvisejícímu s myšlenkou, že elementárními objekty mikrosvěta nejsou bodové částice, ale **vícerozměrné objekty** (struny či membrány, případně i vícerozměrné objekty), které se pohybují ve více než čtyřrozměrném prostoročasu. Další rozměry prostoročasu jsou podstatné, neboť mohou poskytnout klíč právě **ke sjednocení teorie gravitace s kvantovou teorií**. Klasická teorie gravitace je totiž přirozenou limitou teorií strun na velkých vzdálenostech. Tato fascinující myšlenka je hnacím motorem vysoce abstraktních matematických konstrukcí, na jejichž rozvoji pracujeme i v naší sekci.

Analytická teorie matice rozptylu

Vzhledem k praktickým i principiálním obtížím lagranžovského formalismu v kvantové teorii je od 40. let rozvíjena **axiomatická teorie matice rozptylu**, která zkoumá, co lze o interakcích částic odvodit z obecných fyzikálních principů. V 50. letech jsou tak získávány vlastnosti matice rozptylu jako funkce kinematických proměnných (energií, úhlů rozptylu) v komplexních rovinách. Praktickým výsledkem jsou disperzní relace a jim analogické

vztahy, které poskytují korelace mezi měřitelnými veličinami. Souběžně s axiomatickou teorií je rozvíjen přístup **fenomenologický**, v němž je analytičnost matice rozptylu výchozím předpokladem a každá singularita je fyzikálně interpretována. Tento přístup je dnes rozvíjen jako doplněk k lagranžovskému formalismu. Zvláště užitečný je při studiu účinných průřezů při extrémně vysokých energiích. Naši teoretici významně přispěli jednak k odvození vysokoenergetických korelací mezi účinnými průřezy, jednak k formulaci analytických vlastností metodou kombinující mocninné rozvoje s konformním zobrazením.

Teorie pružného rozptylu nukleonů.

Teorií pružného rozptylu hadronů se po více než dvě desetiletí systematicky zabývá několik našich teoretiků. Snaží se formulovat **model popisující prostoročasový průběh srážky** dvou nukleonů, při níž dochází k malému přenosu hybnosti (malému úhlu rozptylu). S tímto procesem úzce souvisí také procesy difrakční disociace nukleonů, jež se v posledních letech staly předmětem intenzivního výzkumu v DESY a FERMILAB.

Kvantová chromodynamika.

Kromě problémů, souvisejících se složitostí výpočtů vyšších řádů poruchové teorie, je situace v QCD komplikována dvěma okolnostmi. První se týká toho, že výsledky výpočtů nejsou jednoznačné, ale závisí na některých nefyzikálních parametrech. Vyšetřování této závislosti je v literatuře věnována velká pozornost, neboť na volbě těchto parametrů závisí výsledky srovnání s daty. Tomuto problému se soustavně věnujeme. Druhým problémem je skutečnost, že poruchové řady nejsou konvergentní, ale v nejlepším případě jen asymptotické rozvoje. Tento problém, s nímž se setkáváme i v kvantové elektrodynamice, je obzvláště aktuální v QCD, neboť číselně jsou příspěvky vyšších řádů v QCD velmi důležité. Vývojem **metod sčítání poruchových řad** v QCD se intenzivně zabýváme.

Znalosti a zkušenosti získané studiem analytické S-matice se ukázaly velmi užitečné i při rozvoji jedné z mála neporuchových metod, které byly v QCD s úspěchem použity. Jedná se o metodu tzv. **součtových pravidel QCD**, jež byla formulována počátkem 80. let s cílem korelovat poruchové a neporuchové aspekty QCD při analýze experimentálních dat. Dva naši teoretikové se této metodě do poloviny 90. let soustavně věnovali a podařilo se jim odvodit řadu zajímavých modifikací těchto pravidel.

Rozvoj matematických metod teoretické fyziky. Důležitou součástí našeho teoretického výzkumu byl a je rozvoj obecných matematických metod, potřebných při řešení konkrétních fyzikálních problémů. Sem patří především systematické studium vlastností grup, jež jsou základním matematickým nástrojem, který umožňuje symetrie používat při popisu fyzikálních systémů. Hlavní pozornost je věnována studiu tzv. **Lieových grup**, jež sehrály klíčovou roli při formulaci našich dnešních představ o struktuře a zákonitostech mikrosvěta.

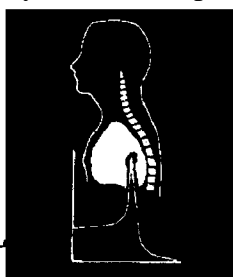
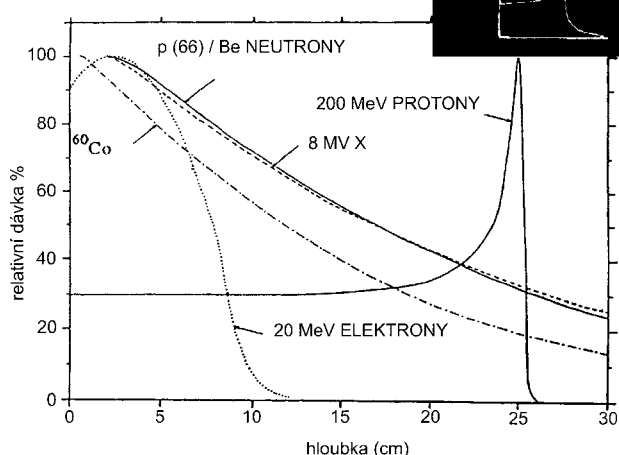
V poslední době se náš zájem upírá také k rozvoji **nekomutativní kvantové teorie pole** a zabýváme se též matematickými aspekty kvantové **teleportace a kvantového počítání**, jimž se z hlediska experimentu zabývají kolegové v sekci optiky.

Aplikace fyziky částic v medicíně a biologii. Vlastní výzkum v částicové fyzice je celosvětově doprovázen studiem jejich aplikací v medicíně, biologii a průmyslu. Příkladem jsou laboratoře CERN, DESY i FERMILAB, s nimiž úzce spolupracujeme i na této tématice. Zaměřili jsme se na využití ionizujících částic v léčbě nádorových onemocnění a na výzkum jejich radiobiologického účinku.

S urychlenými protony a lehkými ionty je spojen významný pokrok v oblasti radioterapie, jejímž cílem je usmrtit (inaktivovat) nádorové buňky při co nejmenším poškození okolních zdravých tkání, zejména těch, které jsou na účinky záření citlivé. Takový požadavek je poměrně lehce splnitelný u nádorů povrchových. Mnohem obtížněji jej lze splnit u nádorů ležících hlouběji pod povrchem, neboť energie předávaná zářením příslušné tkáni klesá u

konvenčních druhů záření (fotonů a elektronů) přibližně exponenciálně s hloubkou, jak je znázorněno tečkovanou křivkou na obr. 22. Ozařuje se proto z několika směrů tak, aby výsledná dávka v nádoru byla pokud možno dostatečná k zajištění inaktivace nádorových buněk, avšak u okolních zdravých tkání se nepřekročila tzv. toleranční dávka. To ovšem s fotony a elektrony nelze vždy splnit. Pokrok v tomto směru přinášejí urychlené hadrony (protony a ionty), u nichž má hloubková dávka značně odlišný průběh; pro protony je znázorněna plnou křivkou na obr. 22. Maximální dávka je u těchto částic předávána teprve těsně před jejich doběhem, v tzv. **Braggově maximu**. Mezi povrchem a tímto maximem je velikost předávané dávky prakticky konstantní, přičemž tkáň ležící za doběhem není radiálně

Obr. 22: Křivky hloubkových dávek pro různé druhy záření, které jsou používány k ozařování nádorových



zatížena. Volbou vstupní energie hadronů lze dosáhnout toho, aby Braggovo maximum leželo vždy v oblasti nádorového ložiska.

Další výhodou urychlených hadronů spočívá v tom, že mají větší hmotnost a proto vykazují značně menší boční rozptyl, což umožňuje ozařovat i nádory ležící v těsné blízkosti orgánů citlivých na záření. Ionty těžší než proton jsou navíc charakterizovány vysokou hodnotou tzv. lineárního přenosu energie (LPE), tj. na jednotku dráhy příslušné částice je předáváno velké množství energie. Je přitom známo, že nepříznivý efekt, kdy se u nedostatečně okysličených nádorových buněk snižuje jejich citlivost vůči ozáření, se u částic s vysokými hodnotami LPE neuplatňuje.

Od ozařování pomocí lehkých iontů se očekává, že přinese zlepšení léčebných výsledků nejen pro nádory lokalizované v blízkosti kritických zdravých struktur, ale i pro radioresistentní nádory. Dávka předávaná v oblasti Braggova maxima iontů je větší než v případě protonů. Proto se očekává, že při ozařování pomocí lehkých iontů bude možné snížit počet frakcí, do nichž je celková aplikovaná dávka rozdělena a tím snížit náklady na léčbu jednoho pacienta.

Pracovníci sekce jsou členy české meziústavní pracovní skupiny, která se podílí na evropské spolupráci **ENLIGHT**. Do této spolupráce je zapojeno 10 evropských institucí, včetně CERN, Evropské společnosti pro terapeutickou radiologii a onkologii **ESTRO** a Evropské organizace pro výzkum a léčbu nádorových onemocnění **EORTC**. Cílem je analyzovat možnosti léčebného využití protonů a iontů a vypracovat projekt klinického zařízení.

Optimální léčebné využití hadronů v konkrétních případech nádorového onemocnění vyžaduje podrobnou znalost jednotlivých fází radiobiologického mechanismu v buňkách. Je nutno detailně analyzovat, čím se liší radiobiologický mechanismus v oblasti Braggova maxima od ostatních úseků dráhy částice, a též od ostatních druhů konvenčního záření. Tato oblast představuje další směr výzkumu, na němž pracujeme. V současné době se podílíme na přípravě evropského projektu **BioART-RELIGHT**, v jehož rámci rozpracováváme naše výsledky týkající se inaktivačního účinku záření na jednotlivé buňky. Vypracovali jsme model, který je schopen charakteristiky radiobiologického mechanismu reprezentovat. To umožňuje sledovat kvantitativně, jak se na celkovém účinku projeví faktory ovlivňující jednotlivé procesy. Příslušné analýzy přispějí k účinnějšímu využití různých druhů záření v léčbě nádorových onemocnění.