Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Jiří Chudoba; Rupert Leitner; Michal Suk

Hledání top kvarku v experimentech na urychlovačích částic

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 40 (1995), No. 5, 264--271

Persistent URL: http://dml.cz/dmlcz/138307

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1995

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.

This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* http://project.dml.cz

Hledání top kvarku v experimentech na urychlovačích částic

Jiří Chudoba, Rupert Leitner a Michal Suk, Praha

1. Úvod

V experimentu na detektoru CDF [1] na urychlovači TEVATRON ve FERMILAB (Fermi National Laboratory) nedaleko Chicaga USA byl pravděpodobně pozorován šestý kvark — top kvark s hmotou asi 180krát větší než hmota protonu (174 GeV/c^2). Nepřímé pozorování top kvarku v experimentech na urychlovači LEP v CERN [2] udává přibližně stejnou hodnotu hmoty top kvarku. Počátkem příštího století se plánuje spuštění velkého urychlovače protonů LHC [3] v CERN. V experimentech na tomto urychlovači se očekává získání přesnějších údajů o top kvarku.

2. Role těžkých kvarků ve Standardním modelu elementárních částic

Podle současného stavu znalostí jsou elementárními částicemi hmoty fermiony (částice s poločíselným spinem) — kvarky a leptony (viz tabulka 1) a jejich antičástice.

	náboj	Rodina		
		I	II	III
kvarky	2/3	u	c	t
	−1/3	d	s	b
leptony	0	ν_e	ν_μ	ν_τ
	−1	e^-	μ^-	τ^-

Tabulka 1. Základní částice Standardního modelu.

Kromě elementárních fermionů existují rovněž elementární bosony (částice s celočíselným spinem). Tyto částice jsou kvanta cejchovacích polí elektroslabé (foton,

Mgr. Jiří Chudoba (1969), doktorand v Nukleárním centru MFF UK, V Holešovičkách 2, 180 00 Praha 8.

RNDr. Rupert Leitner, CSc. (1958), pracuje v Nukleárním centru MFF UK, V Holešovičkách 2, 180 00 Praha 8.

Prof. RNDr. Michal Suk, DrSc. (1933), pracuje v Nukleárním centru MFF UK, V Holešovičkách 2, 180 00 Praha 8.

těžké intermediální bosony $W^{\pm}$ a Z^0) a silné interakce (gluony). Příslušná interakce je vlastně výměnou těchto kvant mezi interagujícími částicemi.

Důležitou součástí Standardního modelu je tzv. Higgsova částice, jediný dosud neobjevený elementární boson.

Leptony jsou neutrina a nabité leptony. Neutrina nemají elektromagnetický náboj a interagují s ostatními částicemi pouze prostřednictvím slabé interakce. Nabité leptony (elektrony, miony a tau) interagují navíc elektromagneticky.

Kvarky se v přírodě nepozorují samostatně, vyskytují se pouze ve vázaných stavech — hadronech. Tyto vázané stavy jsou dvojího druhu: pár kvark–antikvark tvoří částici zvanou mezon (nejlehčím mezonem je π mezon), 3 kvarky nebo 3 antikvarky vytvářejí baryon (např. proton) nebo jeho antičástici. Kvarky interagují s leptony elektroslabě a mezi sebou elektroslabou a navíc silnou interakcí.

Elementární fermiony se vyskytují v tzv. rodinách. Kvarky u (up) a d (down) spolu s elektronem a elektronovým neutrinem tvoří první rodinu nejlehčích fermionů. Další rodinou je dvojice kvarků s (strange) a c (charm) a dvojice mion a mionové neutrino. Historicky první objevenou částicí v této druhé rodině byl mion v pronikavé složce kosmického záření, záhy po něm byly objeveny tzv. „podivné" částice, které obsahují kvark s. Objev čtvrtého kvarku c ve slavných experimentech vedených nositeli Nobelovy ceny B. Richterem a S. Tingem v roce 1974 vlastně znamenal potvrzení klasifikace elementárních částic do rodin. V následujícím roce 1975 byl objeven nový těžký nabitý lepton tau, první člen třetí rodiny elementárních konstituentů hmoty. Konečně v roce 1977 byly nalezeny částice obsahující kvark b (bottom), dosud poslední objevený elementární fermion. Experimenty na urychlovači vstřícných svazků elektronů a positronů LEP v CERN dokázaly, že existují pouze tři rodiny elementárních fermionů s lehkými neutriny. To znamená, že t (top) kvark a tau neutrino jsou s největší pravděpodobností poslední dosud neobjevené elementární fermiony.

3. Top kvark a experimenty na urychlovači LEP

V evropském středisku CERN je v současné době hlavním experimentálním programem studium rozpadů intermediálního bosonu Z^0 v experimentech ALEPH, DELPHI, L3 a OPAL, které se nacházejí na obvodu 27 km dlouhého kruhového urychlovače vstřícných svazků elektronů a pozitronů s celkovou energií právě rovnou hmotě Z^0.

V experimentu DELPHI se účastní skupina českých fyziků z Fyzikálního ústavu Akademie věd ČR a Matematicko-fyzikální fakulty Univerzity Karlovy v Praze.

Jednou z plánovaných oblastí studia v experimentech na LEP bylo studium top kvarku s hmotou menší než energie svazku 45 GeV v anihilacích $e^+e^- \to t\bar{t}$.

Ukázalo se však, že hmota top kvarku je daleko větší než je energie svazků v urychlovači LEP a je proto nemožné pozorovat top kvark v experimentech přímo. Velikost doby života intermediálního bosonu Z^0 změřenou s přesností 1,5 promile a změřenou hodnotu předozadních asymetrií rozpadů Z^0 bosonu nelze bez existence top kvarku v rámci Standardního modelu vysvětlit. Shrnutí údajů ze všech čtyř experimentů na LEP a jejich srovnání s přesnými teoretickými výpočty předpovídá hmotu top

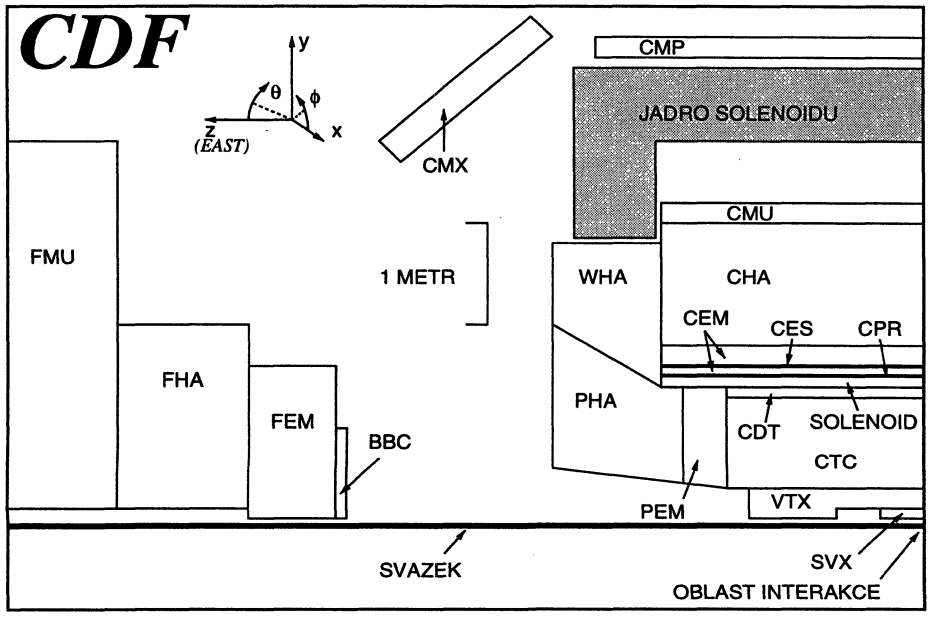
kvarku $m_t = 173^{+12+18}_{-13-20}$ GeV/c^2. První chyba vyplývá ze statistické a systematické chyby v měření parametrů Z^0 bosonu, druhá chyba odráží neurčitost ve hmotě dosud neobjeveného Higgsova bosonu.

Hodnota hmoty top kvarku ukazuje, že top kvark nebude možno pozorovat přímo ani na urychlovači LEP200 s dvojnásobnou energií svazků.

V experimentech na LEP lze však očekávat další zpřesnění údajů o hmotě top kvarku, neboť celková očekávaná statistika rozpadů Z^0 bude celkově asi dvojnásobná ve srovnání se současnou.

4. Experiment CDF ve FERMILAB

V současné době je největším urychlovačem hadronů TEVATRON ve FERMILAB. Je to kruhový urychlovač vstřícných svazků. Urychluje protony a antiprotony na kruhové dráze v navzájem opačném směru. Po dosažení energie svazku 900 GeV se již dále energie nezvyšuje a urychlovací soustava dodává částicím pouze tolik energie, kolik částice ztratí brzdným zářením v důsledku pohybu po zakřivené dráze. Na dvou místech jsou svazky pomocí magnetických čoček nasměrovány proti sobě a částice se srážejí. Místo srážky je voleno tak, aby bylo v centru detektorů. Nyní nabírají data oba dva projektované detektory, CDF a D0.



Obr. 1. Průřez detektorem CDF, zobrazena je jedna čtvrtina. Vysvětlivky ke zkratkám jsou v textu. Převzato a upraveno z [1].

Popišme si podrobněji způsob detekce částic v experimentu CDF. Druh a hybnost částic se určují pomocí komplexní soustavy detektorů, viz obr. 1. Celý detektor je zrcadlově symetrický podél roviny procházející středem detektoru kolmo na směr svazku a zachovává i azimutální symetrii kolem svazku.

Detektor je složen z centrální válcové části, která detekuje částice vylétající s velkou příčnou hybností, a dvou dopředných částí pro registraci částic odchýlených od směru svazku pouze v malém úhlu. Uvnitř centrální části se nacházejí tři dráhové detektory. Nejblíže k místu interakce je umístěn křemíkový mikrostripový detektor SVX (silicon microstrip vertex detector), složený ze 4 válcových vrstev o poloměru 3,0 až 7,9 cm. Tento detektor určuje r-φ souřadnici jednotlivých zásahů s rozlišením 13 μm. Pro určení souřadnice z se využívá driftová komora VTX (vertex drift chamber) s vnějším poloměrem 22 cm. VTX měří bod interakce protonu s antiprotonem s rozlišením v ose z 1 mm. Oba tyto detektory jsou instalovány uvnitř centrální dráhové komory CTC (central tracking chamber). Tato driftová komora je 3,2 m dlouhá, vnější poloměr dosahuje 132 cm. Skládá se z 84 souosých válcových vrstev měřících drátků. Při rekonstrukci dráhy se nejdříve používá informace z CTC k sestavení elementu dráhy, ke kterému se pomocí fitování přiřazují zásahy z VTX a SVX. Všechny tři dráhové detektory jsou umístěny uvnitř supravodivé magnetující cívky délky 4,8 m s poloměrem 1,5 m, která vytváří magnetické pole 1,4 Tesla. V důsledku přítomnosti magnetického pole se dráhy nabitých částic zakřivují a z poloměru křivosti se určuje jejich náboj a hybnost. Pro velmi energetické částice je zakřivení malé, měření hybnosti z dráhových detektorů je zatíženo velkou chybou. Proto je za solenoidem a v dopředné oblasti umístěna soustava elektromagnetických (CEM, PEM, FEM) a hadronových (CHA, WHA, PHA, FHA) kalorimetrů. Kalorimetry se skládají z vrstev absorbátoru a aktivních detektorů. V elektromagnetickém kalorimetru tvoří absorbátor olovo, v hadronovém železo. V centrálních oblastech byl na místě aktivního detektoru použit scintilátor, v dopředných oblastech byly využity proporcionální komory. Pro přesnější měření tvaru spršky v elektromagnetickém kalorimetru se ještě používá proporcionální komora (CES) se čtením signálů z drátků i z na ně kolmých stripů a další proporcionální komora (CPR) umístěná mezi solenoidem a centrálním hadronovým kalorimetrem. V elektromagnetickém kalorimetru obvykle rozvíjejí spršku pouze elektrony a fotony, těžké částice vytvářejí spršky v hadronových kalorimetrech. Pouze dostatečně energetické miony procházejí všemi vrstvami materiálu a dávají signál v mionových komorách (CMU, CMP, CMX). Zvláštní postavení v detekci částic mají neutrina, která s hmotou reagují velmi slabě a nezanechávají v detektoru žádný signál. Jejich přítomnost v případu se odhaluje pomocí rekonstrukce celkového toku energie — nevybalancovaná část se připisuje neutrinům.

Podle Standardního modelu se ve srážkách protonu s antiprotonem s vysokou energií může vytvářet t kvark spolu se svou antičásticí $\bar{\mathrm{t}}$ dvěma způsoby: fúzí 2 gluonů nebo anihilací kvarku s antikvarkem. Pro t kvark s hmotností převyšující 130 GeV/c^2 dominuje v experimentech na urychlovači TEVATRON příspěvek anihilace $\mathrm{q\bar{q}}$.

Dostatečně hmotný t kvark se rozpadá na intermediální nabitý boson W a b kvark. W bosony jsou vysoce nestabilní a rychle se rozpadají s pravděpodobností $\frac{2}{3}$ na 2 kvarky nebo s pravděpodobností $\frac{1}{3}$ na lepton a neutrino. Kvarky se v přírodě

nepozorují samostatně, vyskytují se pouze ve vázaných stavech — hadronech. Tyto vázané stavy jsou dvojího druhu: pár kvark–antikvark tvoří částici zvanou mezon (nejlehčím mezonem je π mezon), 3 kvarky nebo 3 antikvarky vytvářejí baryon (např. proton) nebo jeho antičástici. Kvarky, které se uvolňují v rozpadech těžkých částic, okamžitě hadronizují na hadrony a mezony. V detektoru je pozorujeme jako spršku několika částic vycházejících z místa interakce v jednom směru, tzv. jet. V koncovém stavu reakce $\mathrm{p\bar{p}} \to \mathrm{t\bar{t}} + \mathrm{X} \to \mathrm{W^+b} + \mathrm{W^-\bar{b}} + \mathrm{X}$ tedy pozorujeme buď 6 jetů, nebo 4 jety a 1 lepton, nebo 2 jety a 2 opačně nabité leptony. Pravděpodobnost jednotlivých koncových stavů je v tabulce 2.

Rozpadový kanál	Větvicí poměr
$\mathrm{t\bar{t}} \to (\mathrm{q\bar{q}'b})(\mathrm{q\bar{q}'\bar{b}})$	36/81
$\mathrm{t\bar{t}} \to (\mathrm{q\bar{q}'b})(\mathrm{e}\nu\mathrm{\bar{b}})$	12/81
$\mathrm{t\bar{t}} \to (\mathrm{q\bar{q}'b})(\mu\nu\mathrm{\bar{b}})$	12/81
$\mathrm{t\bar{t}} \to (\mathrm{q\bar{q}'b})(\tau\nu\mathrm{\bar{b}})$	12/81
$\mathrm{t\bar{t}} \to (\mathrm{e}\nu\mathrm{b})(\mu\nu\mathrm{\bar{b}})$	2/81
$\mathrm{t\bar{t}} \to (\mathrm{e}\nu\mathrm{b})(\tau\nu\mathrm{\bar{b}})$	2/81
$\mathrm{t\bar{t}} \to (\mu\nu\mathrm{b})(\tau\nu\mathrm{\bar{b}})$	2/81
$\mathrm{t\bar{t}} \to (\mathrm{e}\nu\mathrm{b})(\mathrm{e}\nu\mathrm{\bar{b}})$	1/81
$\mathrm{t\bar{t}} \to (\mu\nu\mathrm{b})(\mu\nu\mathrm{\bar{b}})$	1/81
$\mathrm{t\bar{t}} \to (\tau\nu\mathrm{b})(\tau\nu\mathrm{\bar{b}})$	1/81

Tabulka 2. Rozpadové kanály páru $\mathrm{t\bar{t}}$.

Z těchto předpokladů vychází i postup pro hledání případů s produkcí t kvarků. Nejvíce případů by se mohlo nalézt v rozpadovém kanálu na 6 kvarků, ale pozadí tvořené procesy kvantové chromodynamiky vedoucími k několika jetům v koncovém stavu neumožňuje odlišení signálu. Jestliže se alespoň jeden W boson rozpadá slabě na elektron nebo mion a příslušné neutrino, je možno pozadí potlačit výběrem případů s jasným signálem leptonu. V 5 % případů se oba W rozpadají na elektron nebo mion. Vhodným výběrem požadavků na vlastnosti případů je v tomto kanálu možno dosáhnout poměru signálu k pozadí většího než 1. Publikovaná zpráva z CDF [1] popisuje analýzu obrovského množství dat. Celkovou statistiku zaregistrovaných případů bývá zvykem vyjadřovat v jednotkách tzv. světelnosti (luminosity). Tato veličina udává počet interakcí připadajících na jednotku účinného průřezu.

V experimentu CDF byla provedena analýza souboru dat, který odpovídal luminositě $19{,}3 \pm 0{,}7\,\mathrm{pb}^{-1}$, tj. přibližně 20 případů na jeden pikobarn účinného průřezu. Protože celkový účinný průřez interakce antiprotonů s protony při energii 1,8 TeV je asi 70 mb, celkový počet interakcí antiprotonů s protony je asi 1,4 bilionu. Analýza se soustředila na koncové stavy s jedním nebo dvěma leptony. V dileptonovém kanálu byly hledány případy s dvěma leptony s velkou transverzální hybností ($> 20\,\mathrm{GeV}/c^2$), velkou chybějící energií $\not{E}_T$ indikující neutrina a dvěma hadronovými jety. Pro t kvark

s hmotou $m_t = 120$ (180) GeV/c^2 lze ze Standardního modelu očekávat pro danou luminositu 3,7 (0,7) případů signálu a 0,56 případů pozadí. V kanálu eμ byly pozorovány **2 případy**, v kanálech ee a $\mu\mu$ žádný.

Hledání signálu s jedním leptonem a jety v koncovém stavu vyžadovalo k potlačení pozadí identifikaci jetu vznikajícího hadronizací b kvarku. Tato identifikace se prováděla dvěma způsoby:

1) Hadrony s b kvarkem, které vzniknou okamžitě při rozpadu t kvarku, za svou krátkou dobu života uletí určitou vzdálenost od místa srážky. Pomocí vrcholového detektoru rekonstruované dráhy částic v jetu z b kvarku se protínají v místě rozpadu b. S takto identifikovaným b jetem bylo nalezeno **6 případů** s očekávaným pozadím $2{,}3 \pm 0{,}3$ případu.
2) Druhou možností identifikace b jetu je přítomnost leptonu mezi částicemi jetu. Kritéria výběru splnilo **7 případů** s předpovězeným pozadím $3{,}1 \pm 0{,}3$. 3 z těchto 7 případů byly společné s první metodou.

Pro nadbytek pozorovaných případů nad pozadím se nabízí vysvětlení přítomností t kvarků v reakcích. Souhrnná pravděpodobnost, že detekovaný signál vznikl náhodnou fluktuací pozadí, je pouze 0,26 %. Za předpokladu, že byl skutečně pozorován t kvark, dává kinematický fit výsledek pro hmotu t kvarku $m_t = 174^{+10+13}_{-10-12}$ GeV/c^2. V současné době experimenty CDF a D0 nabírají další data. Jejich analýza by měla vyjasnit pochybnosti o původu signálu a určit hmotu t kvarku s menší chybou.

5. Studium top kvarku v experimentech na urychlovači LHC

Po objevu nové, nebo očekávané částice, který bývá podmíněn zpracováním velmi rozsáhlého experimentálního materiálu, nastává další etapa — stanovení základních veličin charakterizujících objevenou částici. Mezi tyto veličiny patří hmota, doba života, elektrický náboj, typy interakce, způsoby rozpadu a kvantová čísla (spin, baryonové číslo, podivnost, ...).

Aby bylo možno tato měření provést, je nutno získat dostatečné množství zkoumaných částic. V případě top kvarku to znamená urychlovač s vysokou energií a světelností. Těmto požadavkům vyhovuje v současné době budovaný urychlovač vstřícných svazků proton–proton LHC v Evropském středisku pro fyziku částic CERN.

Celková energie obou svazků bude 14 TeV, tj. 8krát větší než na urychlovači TEVATRON. Pro hmotu 174 GeV/c^2 je dominujícím procesem produkce páru $t\bar{t}$. Procesy produkce pouze t, resp. $\bar{t}$ kvarku mají přibližně o více než řád menší účinné průřezy. Účinný průřez produkce párů $t\bar{t}$ je asi 100krát větší než na urychlovači TEVATRON a při střední světelnosti 1000 pb^{-1} lze očekávat asi milion produkovaných párů $t\bar{t}$ za rok. Proto se urychlovač LHC někdy nazývá „továrna na top kvarky".

Zkoumaný objekt — t kvark — se může rozpadat různými způsoby. Jeho produkci můžeme zjišťovat a jeho vlastnosti stanovit právě měřením produktů jeho rozpadu. Z těchto rozpadů je pouze část měřitelná, ostatní jsou skryty v pozadí způsobeném ostatními procesy. Toto pozadí, které je mnohonásobně větší než měřený efekt

($\sigma_{\mathrm{tot}} \simeq 140\,\mathrm{mb}$, $\sigma_{\mathrm{t\bar{t}}} \simeq 1\,\mathrm{nb}$), je částečně redukováno výběrem případů (trigger). Další výběr „dobrých" případů zajistí měření kinematiky procesů.

Stejně jako v experimentech na urychlovači TEVATRON, pro identifikaci a měření t kvarku na urychlovači LHC se budou využívat kanály s následným leptonovým rozpadem bosonu $\mathrm{W} \to l\nu$ (kde l může být e, μ).

Nejvýhodnější kanál pro vydělení kvarků $\mathrm{t\bar{t}}$ je

$$\mathrm{t\bar{t}} \to \mathrm{W^+W^-b\bar{b}} \to l\nu\,\mathrm{q\bar{q}\,b\bar{b}} \to \text{nabitý lepton, neutrino a 4 jety,} \qquad (1)$$

kde $\mathrm{q\bar{q}}$ je kvark a antikvark vzniklý rozpadem bosonu W. Leptony (zvláště miony) představují velmi dobře identifikovatelný signál. Další oddělení reakce (1) od pozadí je možné změřením hadronů obsahujících kvark b. Vhodným omezením efektivní hmotnosti jetů lze odstranit další pozadí.

Další výhodná reakce je obdobná předchozí s leptonovými rozpady obou bosonů W

$$\mathrm{t\bar{t}} \to \mathrm{W^+W^-b\bar{b}} \to l\nu\,l\nu\,\mathrm{b\bar{b}} \to \text{2 nabité leptony, 2 neutrina a 2 jety.} \qquad (2)$$

Zde je rovněž možno využít identifikace nabitých leptonů a jetů s vzniklých hadronizací b kvarku. Oproti předchozí reakci (1) je tento proces znevýhodněn menší pravděpodobností rozpadu obou W na leptony.

Stanovení hmoty t kvarku

Účinný průřez produkce t kvarku závisí na jeho hmotě. Toho lze využít ke stanovení hmoty t kvarku. Tato hrubá metoda dává hodnotu hmoty t kvarku s přesností asi 10 procent a je již dnes překonána přímým měřením hmoty t kvarku pomocí kinematické rekonstrukce reakcí (1) a (2). V experimentech na LHC se bude pozorovat asi 100 rekonstruovaných případů reakce (1) a 10 případů reakce (2) denně. Při této statistice lze hmotu t kvarku změřit s přesností 2 GeV/c^2.

V programu fyzikálního výzkumu na urychlovači vstřícných svazků LHC v CERN je na předním místě hledání Higgsova bosonu, částice, jejíž existence je spojena se Standardním modelem elektroslabých interakcí. Tento model zatím nejlépe popisuje vlastnosti a vzájemné působení částic. Kromě Higgsova bosonu nebyl do nedávna pozorován t kvark a zatím nebyla experimentálně prokázána existence neutrina z třetí generace leptonů ν_τ. Měření vlastností t kvarku, který byl asi před rokem pozorován, bude patřit mezi hlavní úkoly fyzikálního výzkumu na urychlovači LHC.

6. Závěr

Program výzkumu vlastností a interakcí částic se provádí v řadě laboratoří. Největší střediska (CERN, FERMILAB, DESY) jsou vybavena velkými, výkonnými urychlovači částic.

Vlastnosti těžkého t kvarku mohou být zkoumány pouze při velmi vysokých energiích, tj. na urychlovačích TEVATRON a LHC.

Z pracovišť zabývajících se fyzikou vysokých energií v České republice se Matematicko-fyzikální fakulta Univerzity Karlovy, Fyzikální ústav AV ČR, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská a Fakulta strojní ČVUT připojily k projektu ATLAS [4]. V rámci tohoto projektu byl navržen a nyní se staví velký detekční systém, který bude umístěn ve svazcích protonů urychlovače LHC. Univerzální detektor ATLAS bude získávat údaje o Higgsově částici, t kvarku a částicích obsahujících b kvark. Detektor též umožní pozorování a měření procesů, které plynou z nových teoretických představ. Účast v projektu ATLAS tedy poskytne českým fyzikům možnost podílet se na objevech v oblasti zkoumání fundamentálních vlastností hmoty v dlouhodobé perspektivě.

Dodatek

Krátce po odevzdání článku do redakce byl oznámen objev top kvarku v obou experimentech CDF a D0 na urychlovači TEVATRON ve FERMILAB. Na tiskové konferenci 3. 3. 1995 ve FERMILAB byly sděleny hlavní výsledky obsažené v publikacích [5], [6].

V experimentu CDF byla upřesněna hmota top kvarku $m_t = 176^{+8+10}_{-8-10}$ GeV/c^2. Pravděpodobnost, že všechny pozorované případy byly způsobeny jinými procesy než vznikem $t\bar{t}$ páru, je pouze 1×10^{-6}. V experimentu D0 bylo pozorováno 17 případů, očekávané pozadí je $3{,}8 \pm 0{,}6$ případu. To odpovídá pravděpodobnosti 2×10^{-6}, že signál je způsoben pouze pozadím. Hmota t kvarku určená z tohoto měření $m_t = 199^{+19+22}_{-21-22}$ GeV/c^2 je v rámci experimentálních chyb konzistentní s výsledkem z CDF.

Vysoká hmota top kvarku znamená, že jeho doba života je menší než čas nutný k vytvoření hadronu, který by t kvark obsahoval. Znamená to, že t kvark se rozpadá podle schématu $t \to bW$ dříve, než může baryon nebo meson vzniknout. Studium rozpadu t kvarku umožní prvně studovat vlastnosti téměř volného kvarku.

Literatura

[1] F. Abe et al.: Phys. Rev. D *50* (1994), 5562–5579.

[2] The LEP Collaborations ALEPH, DELPHI, L3, OPAL and The LEP Electroweak Working Group, CERN PPE 94-187.

[3] *Design Study of the Large Hadron Collider.* CERN 91-03 Large Hadron Collider Workshop, CERN 90-10.

[4] ATLAS Technical Proposal, CERN/LHCC/94-43.

[5] F. Abe et al.: *Observation of Top Quark Production in $\bar{p}p$ Collosions.* FERMILAB-PUB-95-022-E.

[6] S. Abachi et al.: *Observation of the Top Quark.* FERMILAB-PUB-95-028-E.