

Fyzika top kvarku na D0 (Run I)

Karel Soustružník

11. leden 2006

- Úvod
 - Fermilab - historie, objevy
 - D0
- Top kvark - produkce, rozpad
- Měření hmoty top kvarku : **Nature 429, 638 (2004)**
- Run II

Fermilab - historie

- Založena NAL : 21.11.1967
- Zahájeny pozemní práce
Linac (1968), Main Ring (1969)
- První svazek : 30.6.1971
- Main Ring, první svazek protonů s
 $E = 200 \text{ GeV}$: 1.3.1972
- NAL přejmenován na FNAL : 1974
- Objev b kvarku : květen-červen 1977
- Dokončen Tevatron (512 GeV) :
červenec 1983
- Stavba \bar{p} zdroje : srpen 1983
- První $p\bar{p}$ srážky při $\sqrt{s} = 1.6 \text{ TeV}$,
CDF detektor : říjen 1985



Fermilab - historie

- D0 detektor uveden do provozu :
14.2.1992
- Objev t kvarku : březen 1995
- Tevatron shutdown : 1997 - 2001
- První přímé pozorování CP violation
(KTeV) : únor 1999
- První pozorování ν_τ (DONUT) : 2000
- Zahájen Tevatron Run II : 1.3.2001
- $\mathcal{L} \sim 1 \text{ fb}^{-1}$: červenec 2005
- Konec Tevatron Run II : 2009 ?

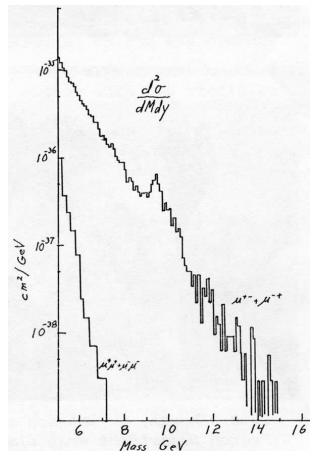
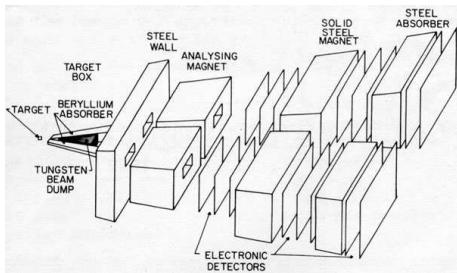


Fermilab



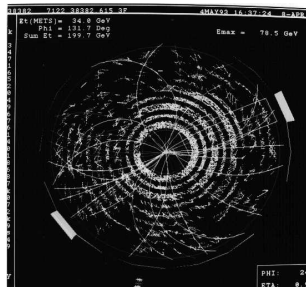
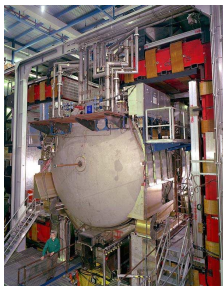
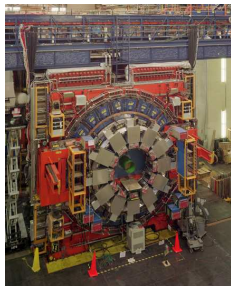
Objev b kvarku

- Experiment č. 288 (E288)
L. Lederman et al., 30.6.1977
- 400 GeV p na Cu,Pt terčik
- Phys. Rev. Lett. 39, 252 (1977)



Objev t kvarku

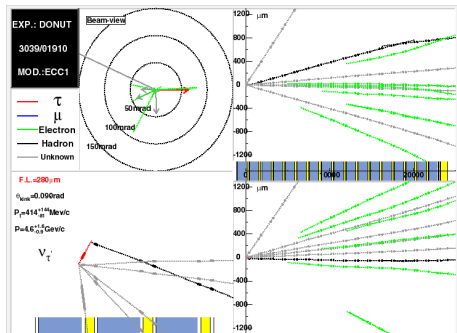
- První přímé pozorování (evidence)
CDF experiment : 26.4.1994
- Objev t kvarku, CDF+D0 kolaborace
2.3.1995
- Phys. Rev. Lett. 74, 2626-2631 (1995)
Phys. Rev. Lett. 74, 2632-2637 (1995)



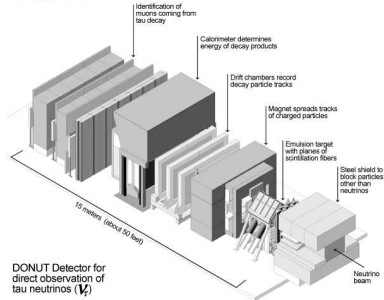
- CDF : data 56 evt.
bkg 23.4 ± 2.9
- D0 : data 17 event
bkg 3.8 ± 0.6

Detekce ν_τ

- DONUT experiment (E872)
- Oznámena evidence ν_τ : 21.7.2000
- 800 GeV p vs. blok wolframu

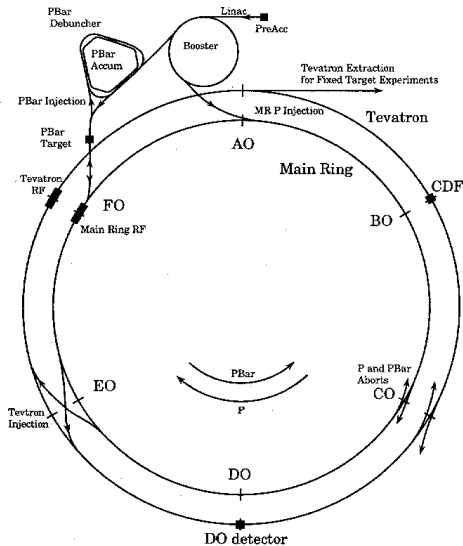


DONUT Detector



Fermilab - soustava urychlovačů

- Zdroj H^- 18 keV
- Cockcroft-Walton 750 keV
- Linac 400 MeV
délka ~ 146 m
- Booster 8 GeV
průměr ~ 151 m
- Main Ring 400 GeV
průměr ~ 1 km
- \bar{p} debuncher, \bar{p} akumulátor
- Tevatron 900 GeV
průměr ~ 1 km



D0 experiment

- D0 experiment umístěn v D0 šachtě Tevatronu
- Spuštěn v únoru 1992
- Run I (1992 - 1996), Run II (2001 - 2009 ?)



- FJFI ČVUT
- FZU AVČR
- MFF UK

The D0 Collaboration

 AZ U. of Arizona CA U. of California, Berkeley U. of California, Riverside Cal. State U., Fresno Lawrence Berkeley Nat. Lab. FL Florida State U. IL Fermilab U. of Illinois, Chicago Northern Illinois U. Northwestern U.	 U. de Buenos Aires	 LAFEX, CBPF, Rio de Janeiro State U. of Rio de Janeiro State U. Paulista, São Paulo	 U. of Alberta McGill U. Simon Fraser U. York U.	 IHEP, Beijing U. of Science and Technology of China	 U. de los Andes, Bogotá
 Charles U., Prague Czech Tech. U., Prague Academy of Sciences, Prague	 LPC, Clermont-Ferrand ISN, IN2P3, Grenoble CFPMS, IN2P3, Marseille LAL, IN2P3, Orsay LPNÉ, IN2P3, Paris DAPNIA/SPPS, CEA, Saclay IfW, Strasbourg IPN, IN2P3, Villeurbanne	 U. San Francisco de Quito	 U. of Aachen Bonn U. U. of Freiburg U. of Mainz Ludwig-Maximilians U., Munich U. of Wuppertal	 Panjab U., Chandigarh Delhi U., Delhi Tata Institute, Mumbai	
 IN Indiana U. U. of Notre Dame IA Iowa State U. KS U. of Kansas Kansas State U. LA Louisiana Tech U. MD U. of Maryland MA Boston U. Northwestern U. MI U. of Michigan Michigan State U. MS U. of Mississippi NE U. of Nebraska NJ Princeton U. NY Columbia U. U. of Rochester SUNY Buffalo SUNY Stony Brook Brookhaven Nat. Lab. OK Langston U. U. of Oklahoma Oklahoma State U.	 University College, Dublin	 KRI, Korea U., Seoul SungKyunKwan U., Suwon	 CINVESTAV, Mexico City	 FOM-NIKHEF, Amsterdam U. of Amsterdam / NIKHEF U. of Nijmegen / NIKHEF	 JINR, Dubna ITEP, Moscow Moscow State U. IHEP, Protvino FNP, St. Petersburg
 TX Southern Methodist U. U. of Texas at Arlington Rice U. VA U. of Virginia WA U. of Washington	 Lund U. RIT, Stockholm Stockholm U. Uppsala U.	 PI of the U. of Zurich	 Lancaster U. Imperial College, London U. of Manchester	 HCP, Hochiminh City	

Ann Harrison, UC Riverside

D0 detektor

- Dráhové detektory

$$\sigma(\text{vertex}) = 6 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned}\sigma(r\phi) &= 60 \mu\text{m} \text{ (VTX)} \\ &= 180 \mu\text{m} \text{ (CDC)} \\ &= 200 \mu\text{m} \text{ (FDC)}\end{aligned}$$

- Kalorimetr

$$|\eta| < 4$$

$$\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.1 \times 0.1$$

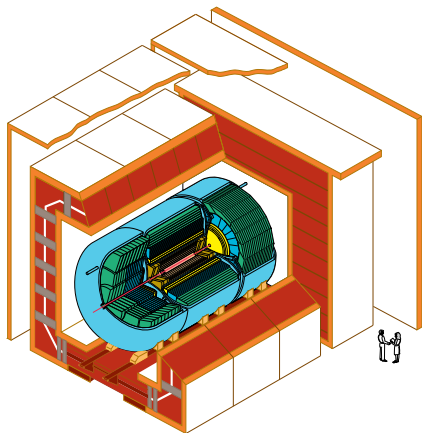
$$\text{EM} : \sigma(E)/E = 15\% / \sqrt{E}$$

$$\text{HAD} : \sigma(E)/E = 50\% / \sqrt{E}$$

- Mionový detektor

$$|\eta| < 3.3$$

$$\frac{\delta p}{p} = 0.2 \oplus 0.01 p$$

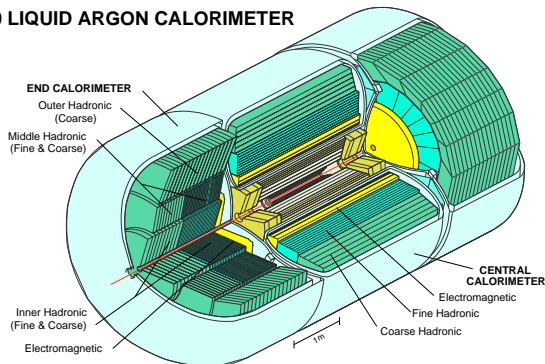


D0 Detector

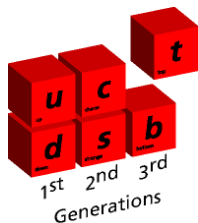
D0 kalorimetr

- Centrální barel (CC)
2 dopředné barely (EC)
- Části kalorimeru :
elektromagnetická (EM),
hadronová (FH,CH)
- LAr/U (EM,FH)
LAr/Cu(ocel) (CH)
- $|\eta| < 4.1, 5.2$ (EM,HAD)
- $21 X_0$ (EM), $> 7.2 \lambda_{int}$ (celkem)
- $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.1 \times 0.1, 0.05 \times 0.05$ (EM)
- $\frac{\sigma(E)}{E} \sim \frac{15\%}{\sqrt{E}}$ (e), $\sim \frac{50\%}{\sqrt{E}}$ (π), $\sim \frac{80\%}{\sqrt{E}}$ (jety)

D0 LIQUID ARGON CALORIMETER

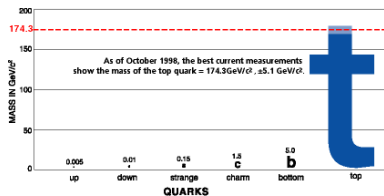


Top kvark



- První pozorování (evidence)
CDF, duben 1994
 $\mathcal{L} = 19.3 \text{ pb}^{-1}$
- Objev (discovery)
CDF+D0, únor 1995
CDF : $\mathcal{L} = 67 \text{ pb}^{-1}$
D0 : $\mathcal{L} = 44 - 56 \text{ pb}^{-1}$

- $Q = +2/3$
- $S = 1/2$
- $t_{3L} = +1/2$
- $m_t = 172.7 \pm 2.9 \text{ GeV}$
(CDF+D0, RunI + RunII)



Top kvark - produkce a rozpad

- Produkce

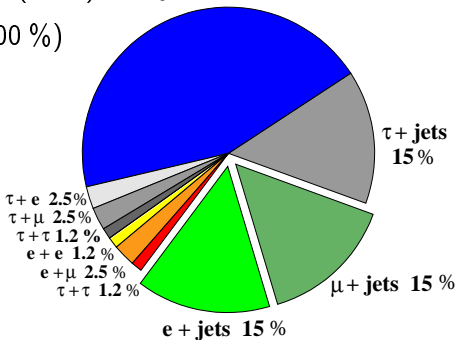
Tevatron : $p\bar{p} \rightarrow t\bar{t} + X$ $q\bar{q} \rightarrow t\bar{t}$ (85 %), $gg \rightarrow t\bar{t}$ (15 %)
 $p\bar{p} \rightarrow t + X$ (single top) - zatím nepozorováno

Run I : 700 $t\bar{t}$ párů

Run II : 9000 $t\bar{t}$ (2005) **All jets 44 %**

- Rozpad : $t \rightarrow W^+ + b$ (~ 100 %)

- 2 leptonový kanál
- lepton + jety
- multijetový kanál



Měření m_t - data

- Run I (1992 - 1996), $\mathcal{L} = 125 \text{ pb}^{-1}$
- Výběrová kritéria
 - izolovaný e nebo μ s $E_T > 20 \text{ GeV}$
 - $|\eta^e| < 2.0$ nebo $|\eta^\mu| < 1.7$
 - 4 jety s $E_T > 15 \text{ GeV}$ a $|\eta^{jet}| < 2.0$
 - $\cancel{E}_T^{cal} > 25 \text{ GeV}$ e+jety (netagovaný), nebo $\cancel{E}_T^{cal} > 20 \text{ GeV}$ μ +jety (tagovaný + netagovaný)
 - $\cancel{E}_T > 20 \text{ GeV}$
 - tagované eventy dále
 - $\cancel{E}_T > 35 \text{ GeV}$, pokud $\Delta\phi(\cancel{E}_T, \mu) < 25^\circ$ e+jety
 - $\Delta\phi(\cancel{E}_T, \mu) < 170^\circ$ a $|\Delta\phi(\cancel{E}_T, \mu) - 90^\circ| < \cancel{E}_T / 45 \text{ GeV}$ μ +jety
 - netagované eventy dále
 - $E_T^W \equiv E_T^{lep} + \cancel{E}_T > 60 \text{ GeV}$
 - $|\eta^W| < 2.0$
- 71 eventů

Reanalýza Run I dat novou metodou (2004)

Hustota pravděpodobnosti produkce sady veličin x jako funkce M_t

$$P(x, M_t) = \frac{1}{\sigma(M_t)} \int d\sigma(y, M_t) dq_1 dq_2 f(q_1) f(q_2) W(y, x)$$

- $d\sigma(y, M_t) \sim d^{18}(y)\delta^4$ - partonový diferenciální účinný průřez
- $W(y, x)$: obecná přenosová funkce, $p(y \rightarrow x)$
 - y : sada 18 proměnných (6 objektů ve finálním stavu)
 - x : sada 11 dobře měřených proměnných
 - energetické rozlišení detektoru
- $f(q)$: partonové distribuční funkce
- $\sigma(M_t)$: totální účinný průřez $t\bar{t}$ produkce

Měření m_t

- Akceptance detektoru $A(x)$ vstupuje do hry ve vztahu mezi pravděpodobností detekce pozorovaných veličin x , $P_m(x, M_t)$ a pravděpodobností jejich produkce $P(x, M_t)$

$$P_m(x, M_t) = A(x) P(x, M_t)$$

- Výraz pro $P(x, M_t)$ se zintegruje přes 11 přesně měřených veličin (3 komponenty hybnosti nabitého leptonu a 8 jetových úhlů) a 4 zákony zachování energie a hybnosti ($\delta^4(P_i - P_f)$)
- integrace přes všechny možné partonové stavy vedoucí k danému pozorovanému jevu

Měření m_t

Pravděpodobnost interpretace eventů jako $t\bar{t}$

$$P_{t\bar{t}} = \frac{1}{12\sigma(M_t)} \int d^5\Omega \sum_{perm,\nu} |\mathcal{M}_{t\bar{t}}|^2 \frac{f(q_1)f(q_2)}{|q_1||q_2|} \Phi_6 W_{jety}(E_{part}, E_{jet})$$

- Ω - sada 5 integračních proměnných
- $\mathcal{M}_{t\bar{t}}$ - LO maticový element $t\bar{t}$ produkce
- $f(q_1), f(q_2)$ - CTEQ4M partonové distribuční funkce incidentních kvarků
- Φ_6 - faktor fázového prostoru finálního stavu se 6 objekty
- suma přes všech 12 permutací jetů a všechna neutrinová řešení
- $W_{jety}(E_{part}, E_{jet})$ - pravděpodobnost naměření jetů s E_{jet} z partonů o energiích E_{part} , detailní MC studie

Měření m_t

- Podobně se určí pravděpodobnost interpretace eventů jako pozadí, s užitím maticového elementu produkce $W + jety$ případů (nezávisí na M_t), P_{bkg}
- Testy s HERWIG MC vzorky odhalily snížení statistické chyby měřené M_t faktorem ~ 2 proti původní analýze
- Extrahovaná M_t závisí na podílu pozadí v analyzovaném vzorku \Rightarrow podmínka na P_{bkg} eventů
- 22 eventů ve finálním vzorku (z původních 71)

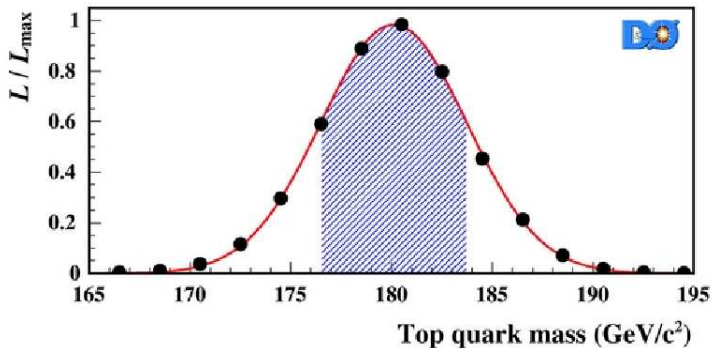
Měření m_t

Celková pravděpodobnost (součin pravděpodobností jednotlivých eventů) jako funkce M_t

$$\begin{aligned} \ln L(M_t) &= \sum_{i=1}^N \ln [c_1 P_{t\bar{t}}(x_i, M_t) + c_2 P_{bkg}(x_i)] \\ &\quad - N \int A(x) [c_1 P_{t\bar{t}}(x, M_t) + c_2 P_{bkg}(x)] dx \end{aligned}$$

- N - počet případů ve vzorku dat
- c_i - relativní zastoupení signálu a pozadí ve vzorku
- Numerická integrace (metoda MC)
- Z maxima grafu $L(M_t)$ se určí nejpravděpodobnější hodnota M_t

Měření m_t - výsledek



$$M_t = 180.1 \pm 3.6 \text{ (stat)} \pm 3.9 \text{ (syst)} \text{ GeV}$$

$$M_t = 180.1 \pm 5.3 \text{ GeV}$$

Měření m_t - systematické chyby

- Energetická škála jetů $\delta M_t = 3.3 \text{ GeV}$
- Monte Carlo model signálu $\delta M_t = 1.1 \text{ GeV}$
- Monte Carlo model pozadí $\delta M_t = 1.0 \text{ GeV}$
- Šum kalorimetru a event pile-up $\delta M_t = 1.3 \text{ GeV}$
- Extrakce M_t $\delta M_t = 0.6 \text{ GeV}$

- Celkem $\delta M_t = 3.9 \text{ GeV}$

Měření m_t - srovnání měření

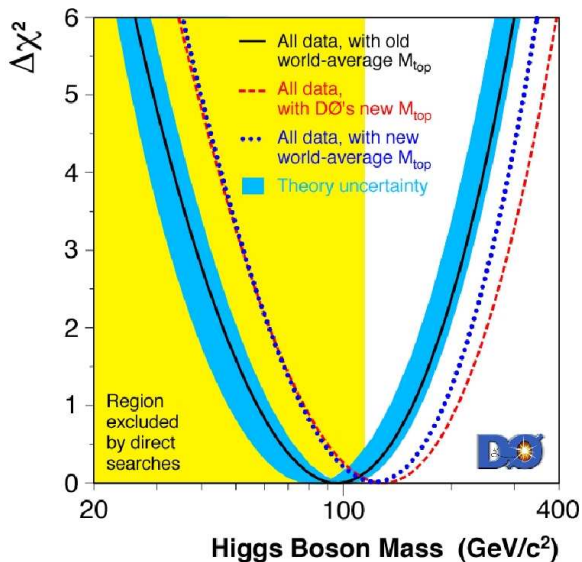
Původní (1998)

- 91 eventů
- Všechny eventy mají stejnou váhu
- Pouze nejlepší z kombinací jetů
- $M_t = 173.3 \pm 7.8$ GeV

Nové (2004)

- 71 eventů
- Větší váhu eventům dobře změřeným a s větší $P_{t\bar{t}}$
- Vážený součet všech kombinací jetů
- $M_t = 180.1 \pm 5.3$ GeV

Top vs. Higgs



Top quark - Run II

- Run I (CDF+D0)
 $M_t = 174.3 \pm 5.1$ GeV
- Run I + nové měření
 $M_t = 178.0 \pm 4.3$ GeV
- Run I+II (CDF+D0)
 $M_t = 172.7 \pm 2.9$ GeV

