



Tevatron:

przegląd wyników

Tomasz Fruboes  
Narodowe Centrum Badań Jądrowych

Tevatron, CDF, D0  
Fizyka B  
Fizyka kwarku top  
W, Z, WW, ZZ  
Higgs  
Egzotyka

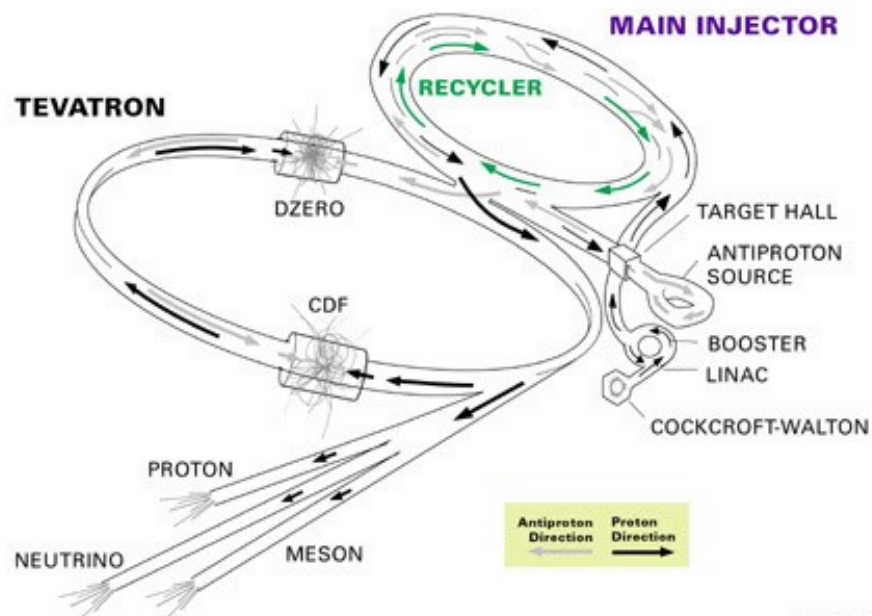
# Plan

1. Wprowadzenie - Tevatron, CDF i D0
2. Fizyka B
3. Fizyka kwarku top
4. Fizyka elektroslaba - W, Z, WW, WZ, ZZ
5. Poszukiwania bozonu Higgsa
6. Poszukiwania nowej fizyki

# Tevatron krok po kroku



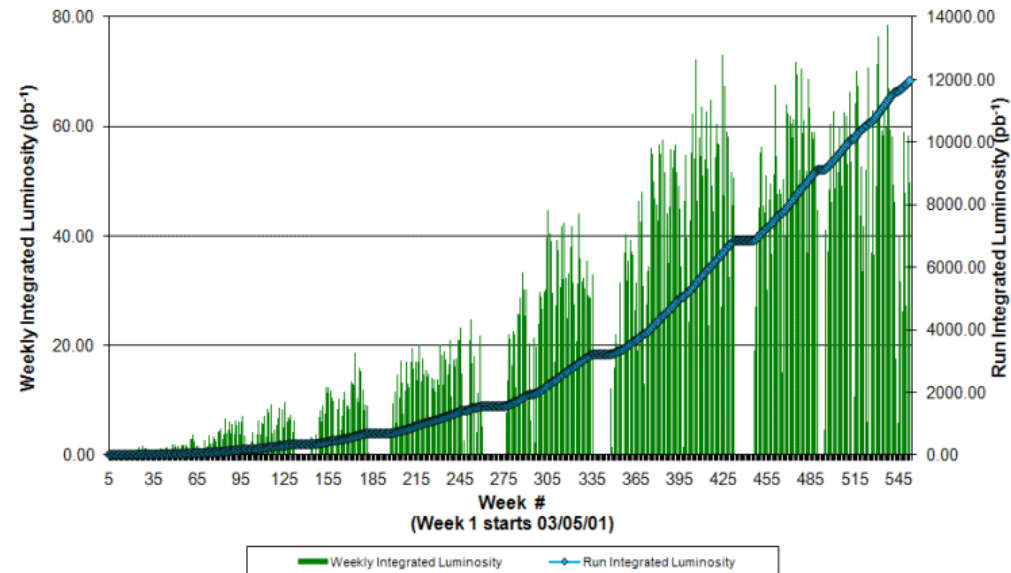
FERMILAB'S ACCELERATOR CHAIN



- Zderzacz  $p\bar{p}$
- 6.5 km obwodu
- 980 GeV/wiązka
- 36 paczek
  - $\Delta t = 396$  ns
  - $3 \times 10^{11}$  p/paczka,  $3 \times 10^{10}$   $\bar{p}$ /paczka
- Dwa duże eksperymenty – CDF i DØ
  - ~500 osób/eksperyment

# Tevatron krok po kroku (2)

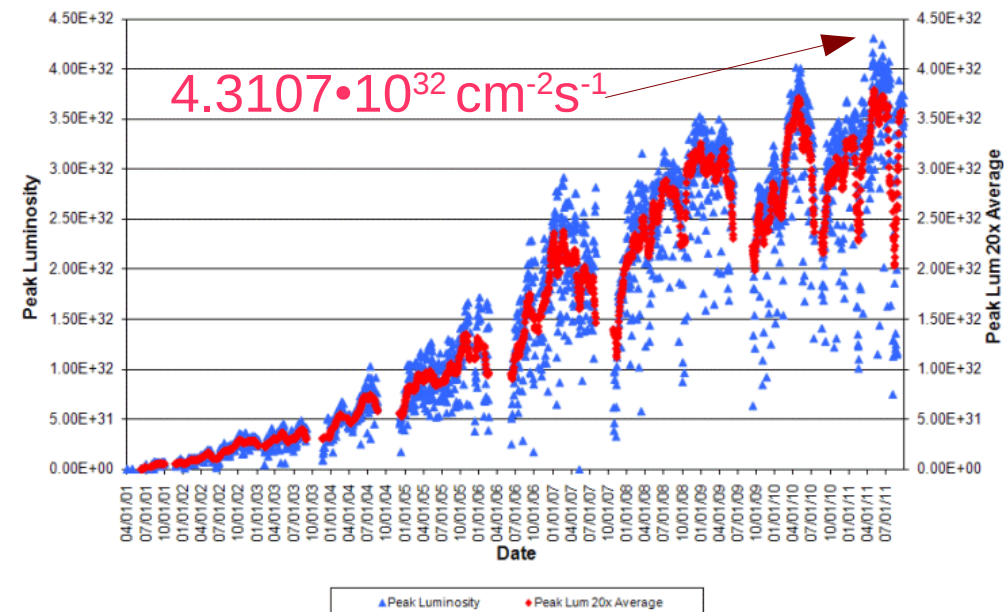
Collider Run II Integrated Luminosity



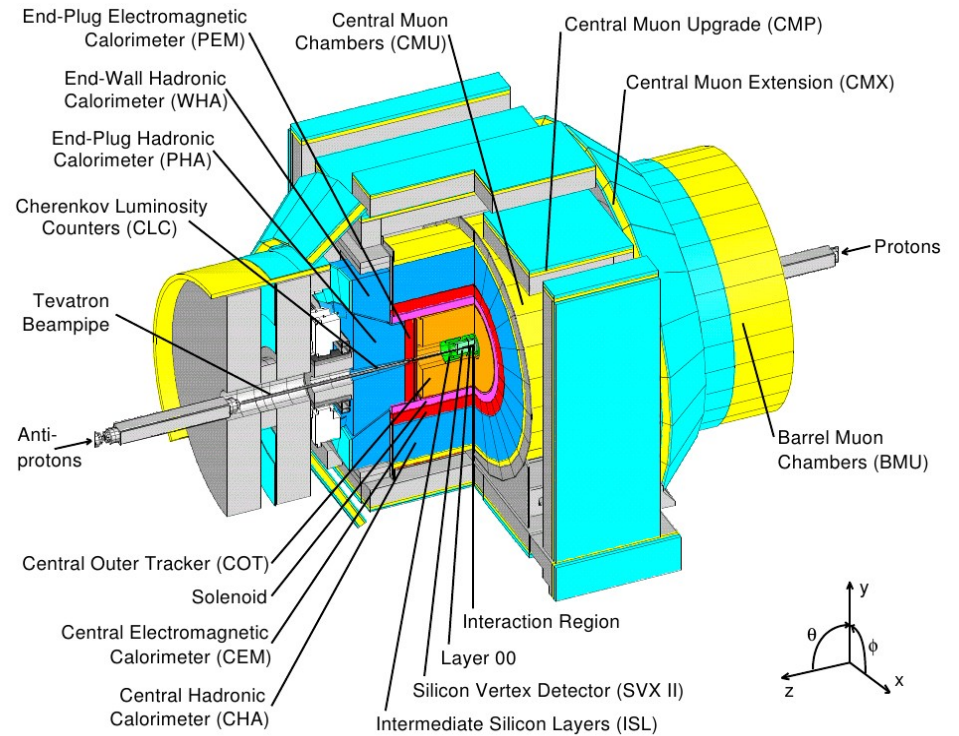
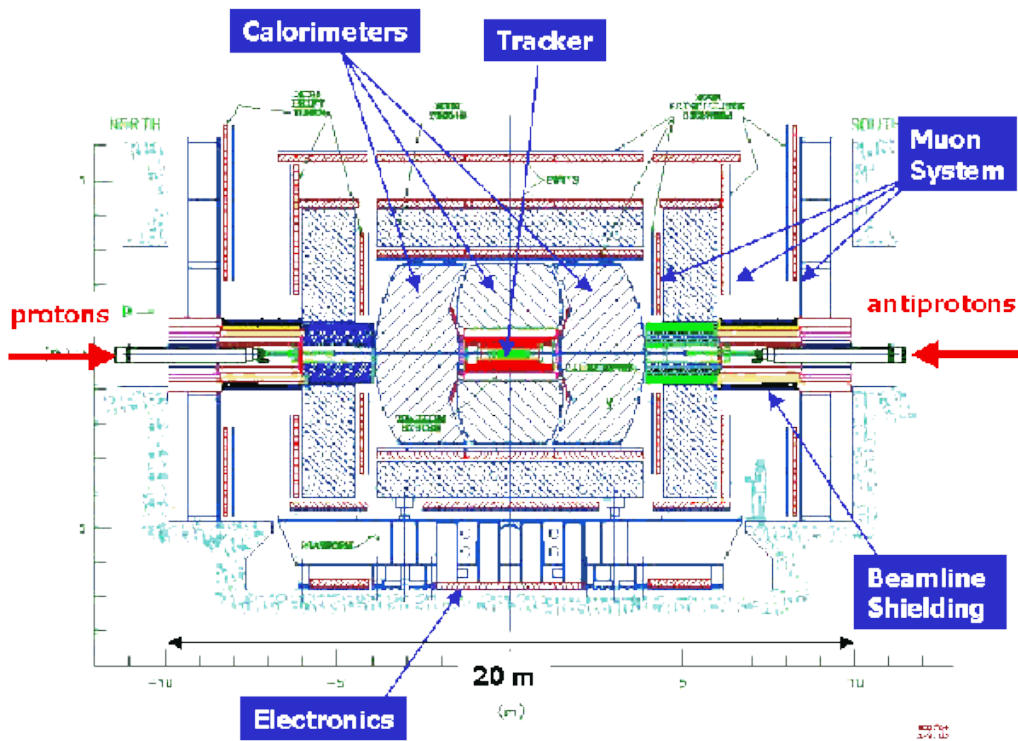
Dane zbierane w dwóch okresach:

- Run 1 – 1992-1996
  - 160 pb<sup>-1</sup>/eksperyment, 1.8 TeV
- Run 2 – 2001-2011
  - Zwiększenie energii i świetności
  - ~10 fb<sup>-1</sup>/eksperyment, 1.96 TeV
  - Ostatnie kolizje – 30 września 2011

Collider Run II Peak Luminosity



# D0 i CDF



- Krzemowy detektor śladowy:  $|\eta| < 3$
- "Scintilating Fiber Tracker":  $|\eta| < 1.7$
- Kalorymetr EM (argon/uran):  $|\eta| < 3$
- Kalorymetr hadronowy:  $|\eta| < 3$
- Komory mionowe:  $|\eta| < 2$
- Pole magnetyczne: do 2 T

- Krzemowy detektor śladowy:  $|\eta| < 2.5$
- "Central Outer Tracker" (argon):  $|\eta| < 1 \sim 2$
- Kalorymetr EM (pb/scint):  $|\eta| < 3.6$
- Kalorymetr hadronowy (fe/scin):  $|\eta| < 3.6$
- Komory mionowe:  $|\eta| < 1.5$
- Pole magnetyczne: 1.4 T

# Fizyka B

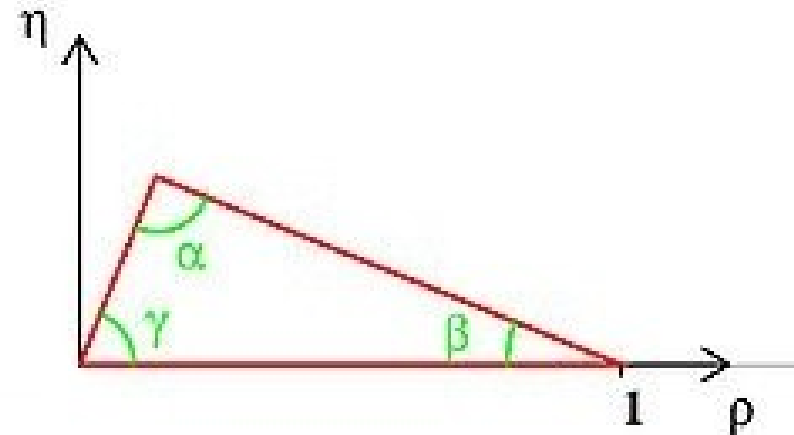
# Fizyka B

- Duża część programu fizycznego w Tevatronie. CDF - 150 publikacji, D0 – 60 publikacji. W tym:
  - **"Observation of  $B_s - \bar{B}_s$  Oscillations"**, PRL 97, 242003 (2006)
  - **"Updated Measurement of CP Violating Phase  $\beta_s^{J/\psi\phi}$ "**, arxiv:1112.1726 – niezgodność  $2\sigma$  z MS
  - **"Evidence for an anomalous like-sign dimuon charge asymmetry"**, Phys. Rev. D 82, 032001 (2010) - niezgodność  $3.2\sigma$  z MS
  - **"Search for  $B_0(s) \rightarrow \mu^+\mu^-$ "**, PRL 107, 191801 (2011)

# Macierz CKM

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix} \quad V = \begin{pmatrix} 1 - \lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} + O(\lambda^4)$$

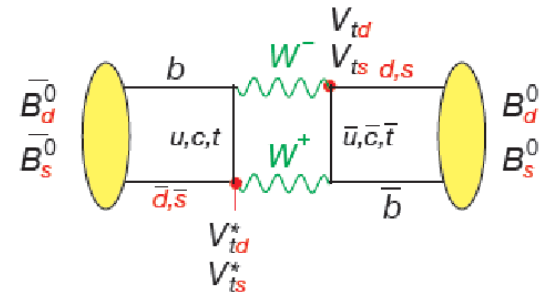
- Macierz łącząca stany własne kwarków ze względu na zapach ze stanami własnymi masy w oddziaływaniach słabych
- Macierz unitarna. Testy unitarności ważnymi testami MS
- Wyniki zwykle obrazowane przez trójkąt unitarności (pomiar kątów i boków)



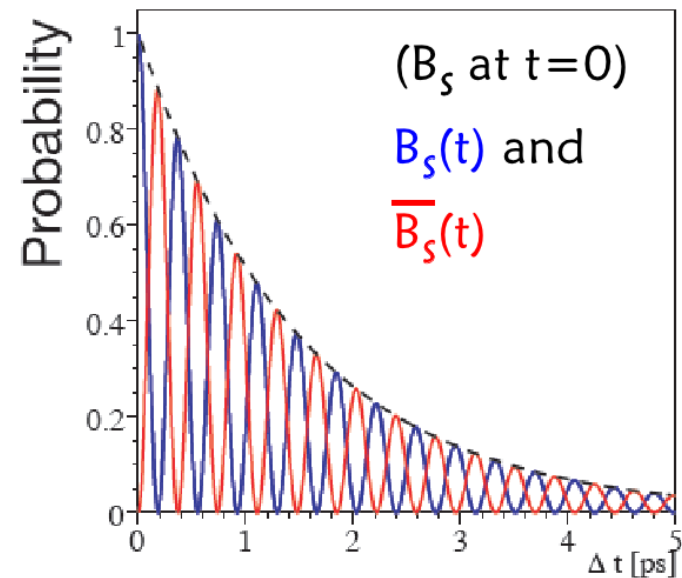


# Oscylacje $B_s$

- $|B_0\rangle = (\bar{b}s)$ ,  $|\bar{B}_0\rangle = (b\bar{s})$
- Stany własne masy złożone ze stanów kwarkowych:
  - $|B_L\rangle = p|B_0\rangle + q|\bar{B}_0\rangle$
  - $|B_H\rangle = p|B_0\rangle - q|\bar{B}_0\rangle$
- Różne masy ( $\Delta m$ ) i czasy życia ( $\Delta\Gamma$ ) stanów wł. CP
  - Oscylacje
- Pomiar oscylacji – istotny pomiar dla trójkąta unitarności

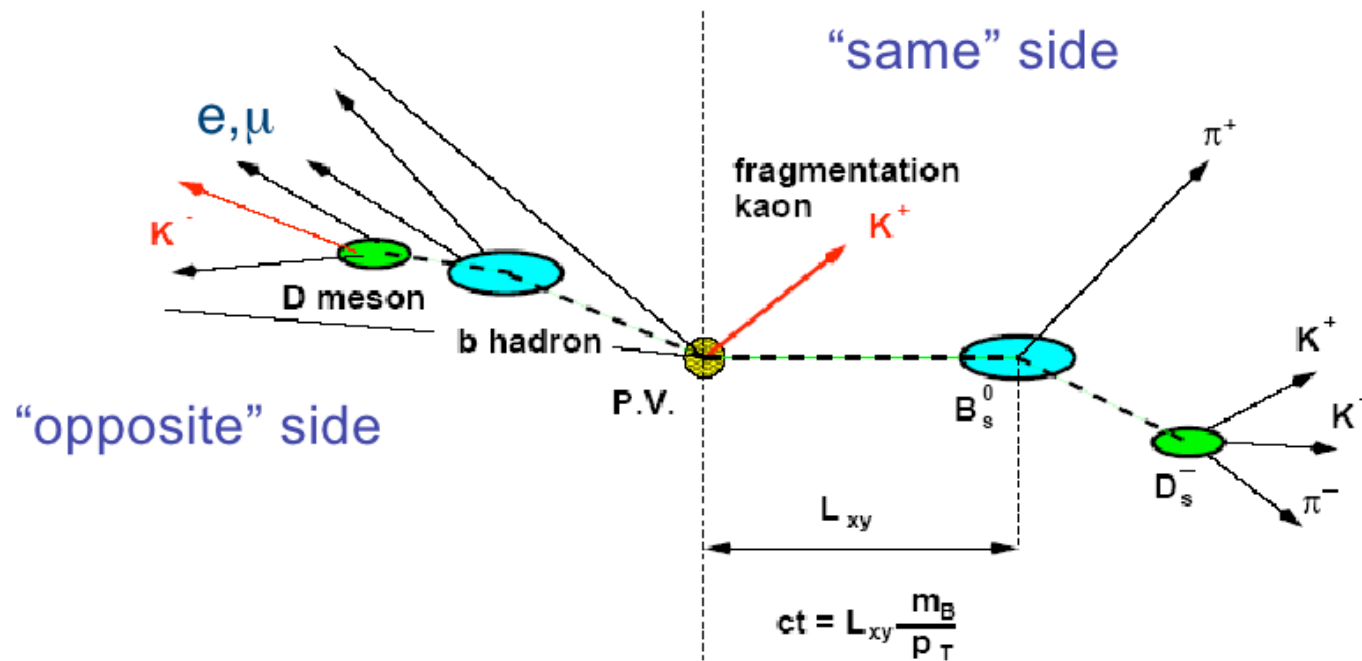


$$i \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} B_s^0 \\ \bar{B}_s^0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M - \frac{i\Gamma}{2} & M_{12} - \frac{i\Gamma_{12}}{2} \\ M_{12}^* - \frac{i\Gamma_{12}^*}{2} & M - \frac{i\Gamma}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_s^0 \\ \bar{B}_s^0 \end{pmatrix}$$



$$\text{Prob}[\bar{B}^0](t) = \frac{1}{4} [\exp(-\Gamma_1 t) + \exp(-\Gamma_2 t) - 2\exp(-\Gamma t) \cos(\Delta m t)]$$

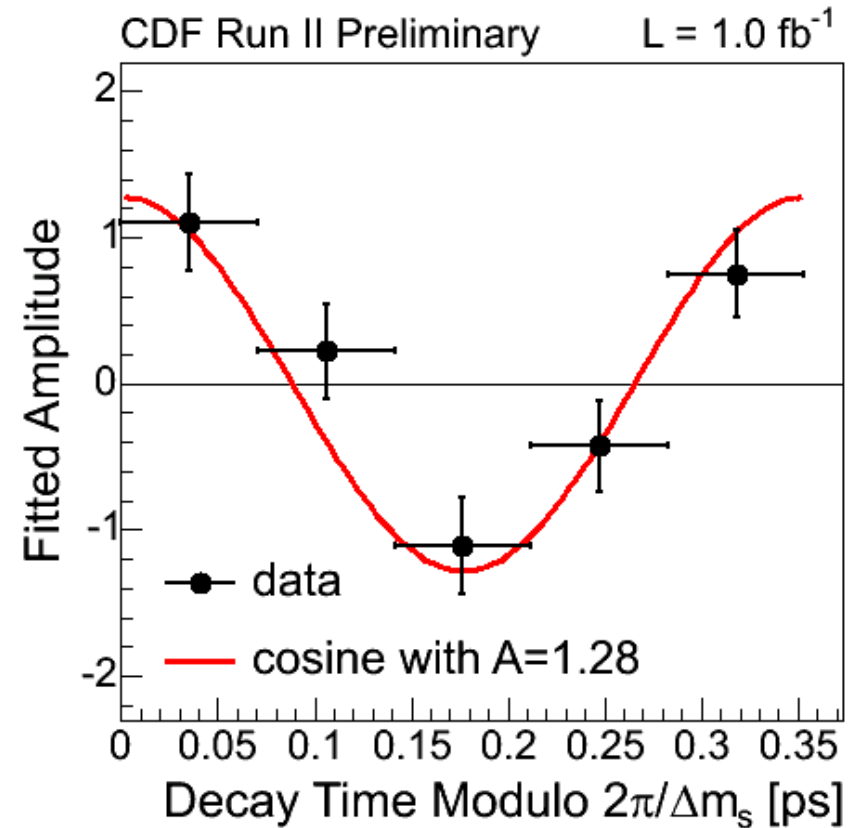
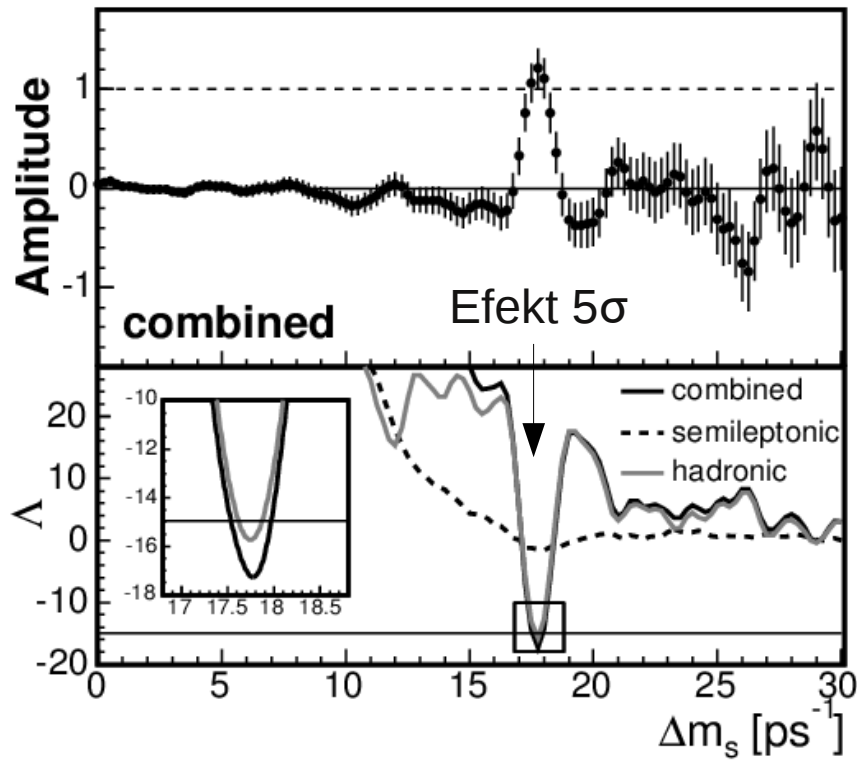
# Oscylacje $B_s$ - analiza CDF



## Trzy kluczowe elementy analizy:

- **Oznaczanie stanu końcowego** (identyfikacja  $B_s/\bar{B}_s$ )  
- wybór  $D_s$  (różne stany końcowe) + wymaganie pion/mion
- **Oznaczanie stanu początkowego** ( $B_s/\bar{B}_s$ ) – np. korzystając z drugiego  $b$
- **Pomiar czasu** – odległość wierzchołków pierwotnego i wtórnego

# Oscylacje $B_s$ - wyniki



Test istnienia oscylacji – dopasowanie krzywej opisującej prawdopodobieństwo przejścia  $B_s \rightarrow \bar{B}_s$  (i odwrotne) dla różnych wartości  $\Delta m_s$ :

$$0.5 \cdot e^{-\Gamma t} \cdot (1 - A \cdot \cos(\Delta m_s \cdot t))$$

Dopasowana amplituda oscylacji  $A$  wynosi  $1.21 \pm 0.20$  (zgodna z 1) – obserwujemy oscylacje

- Określa wartość  $\Delta m_s$

# Kwark t





Ogłoszenie odkrycia kwarku top, marzec 1995

# 1995...

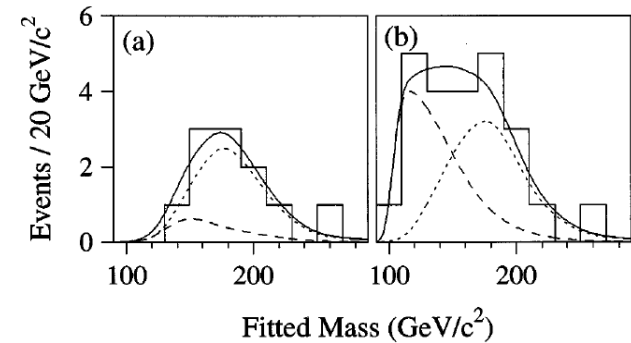
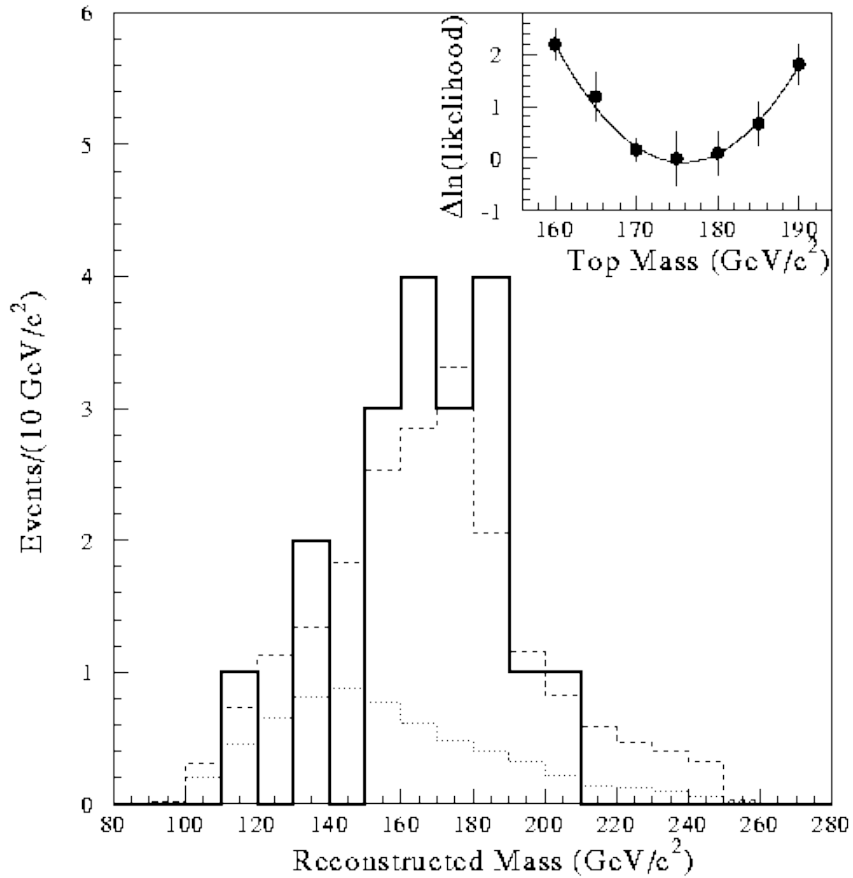
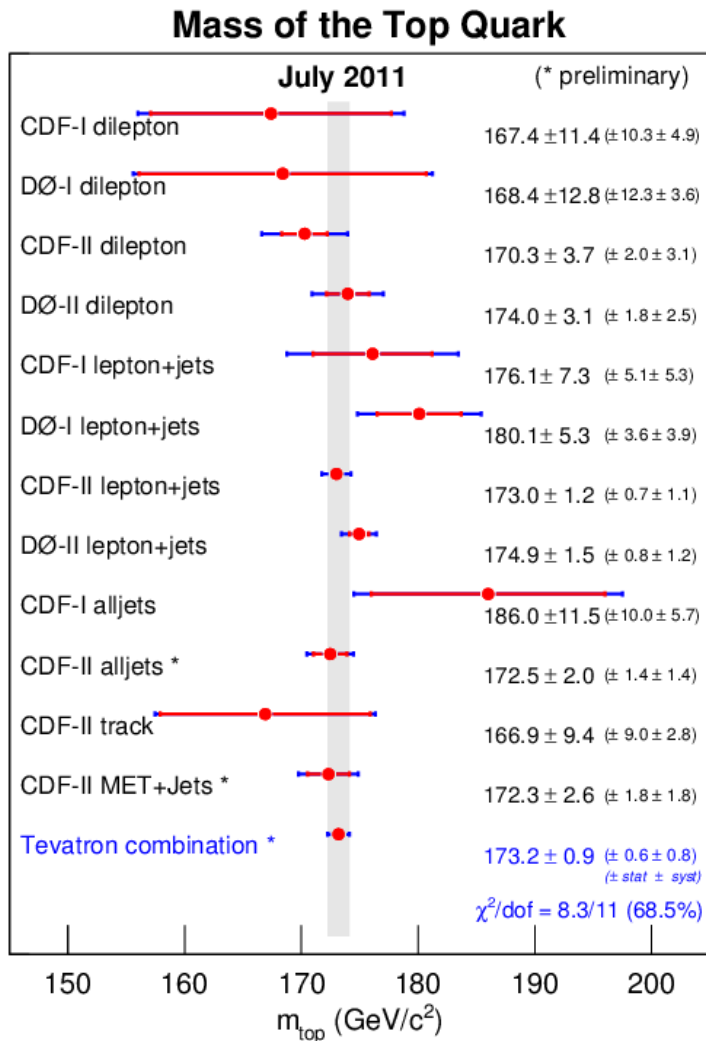


FIG. 5. Fitted mass distribution for candidate events (histogram) with the expected mass distribution for 199  $\text{GeV}/c^2$  top quark events (dotted curve), background (dashed curve), and the sum of top and background (solid curve) for (a) standard and (b) loose event selection.

- Jednoczesna publikacja CDF i D0
  - D0 wyznacza masę  $199^{+19}_{-21}(\text{stat}) \pm 22(\text{syst}) \text{ GeV}$ , masa CDF bardzo bliska wartości współczesnej

# ...2011



***"Combination of CDF and DO results on the mass of the top quark using up to 5.8fb<sup>-1</sup> of data"***

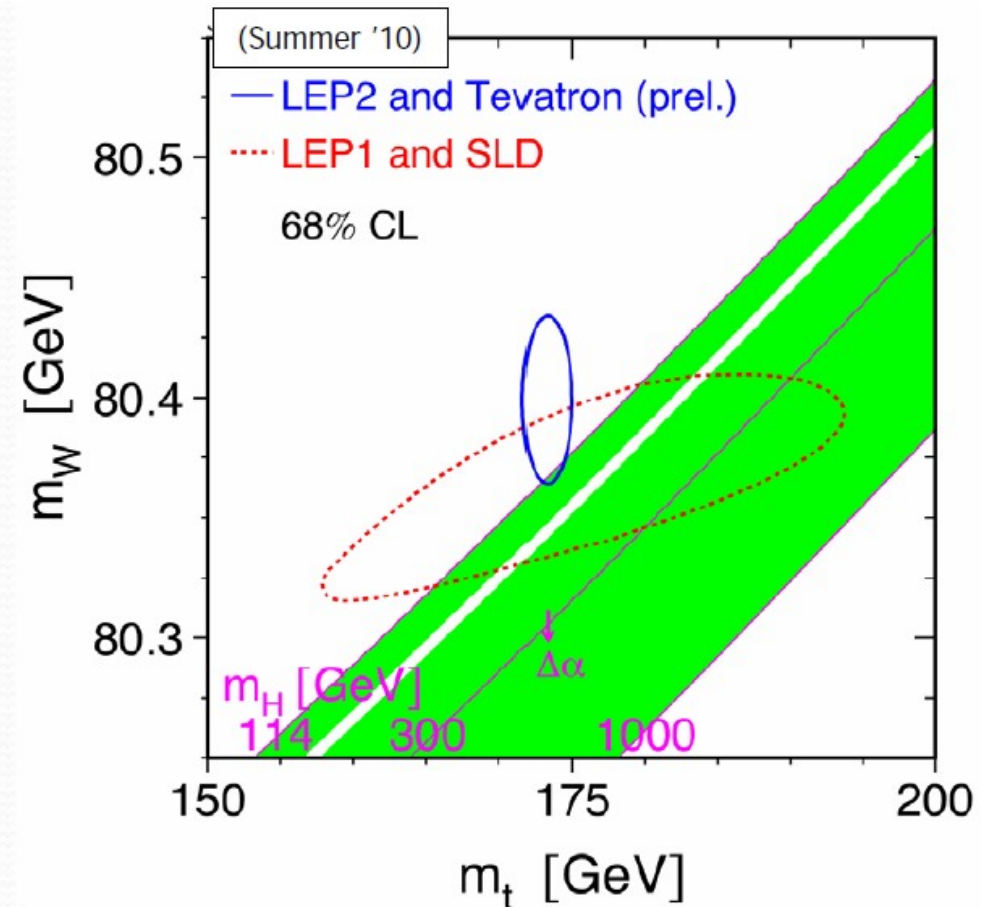
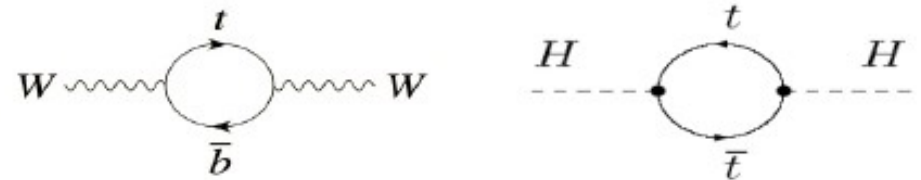
arXiv:1107.5255v3

$$M_t = 173.2 \pm 0.56^{\text{stat}} \pm 0.75^{\text{syst}} \text{ GeV}$$

# Masa kwarku t – motywacja

Dlaczego warto znać masę kwarku t?

- Wolny parametr MS
- Istotna przy obliczaniu poprawek radiacyjnych w procesach elektroślabych
- Wraz z masą W daje ograniczenia na masę Higgosa



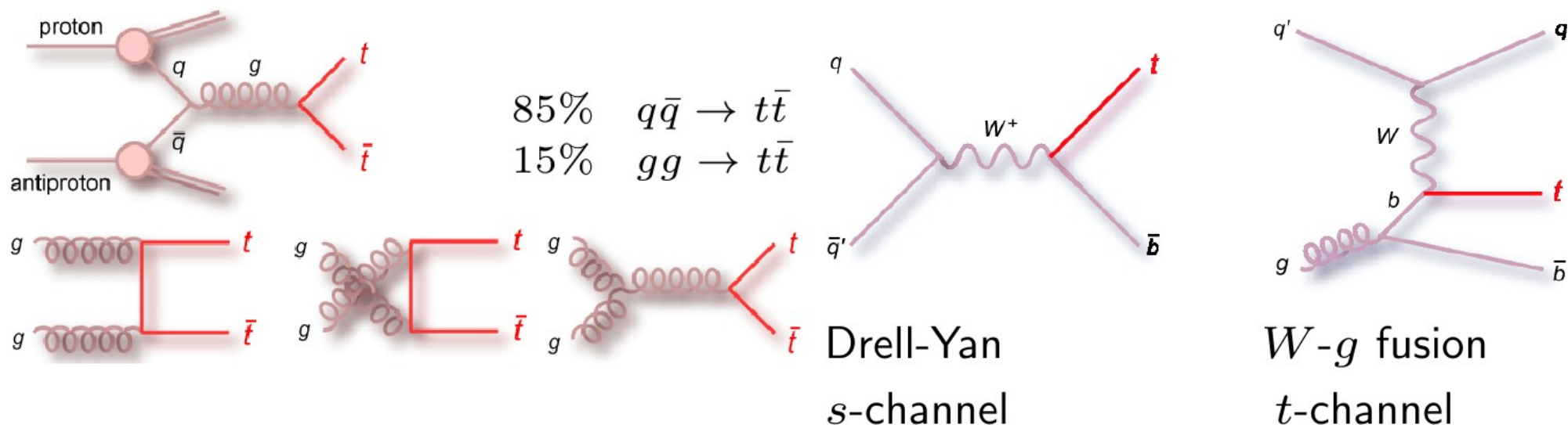


# Czego możemy dowiedzieć się z $t$ ?

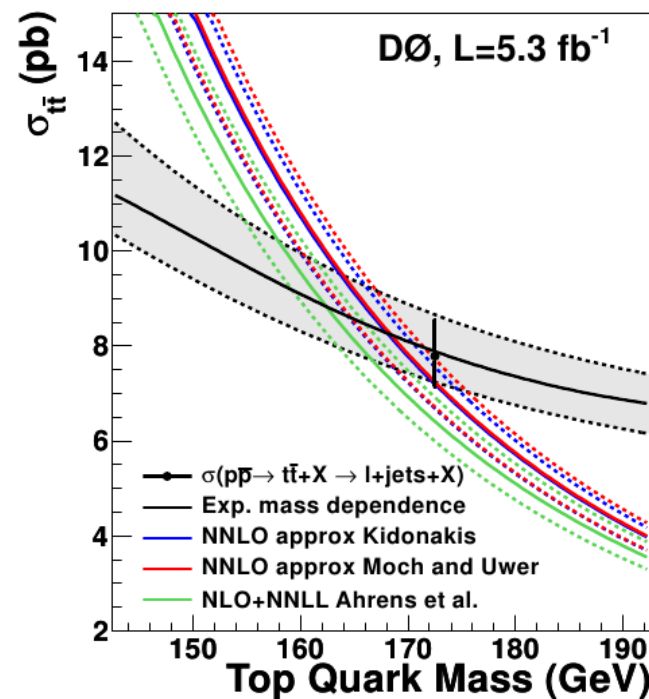
Jedyny swobodny kwark w modelu standardowym. Rozpad przed hadronizacją. Testy modelu standardowego przy użyciu  $t$ :

- **Przekrój czynny na produkcję  $t\bar{t}$**
- **Przekrój czynny na produkcje pojedynczego kwarku  $t$**
- Różnica mas:  $t - \bar{t}$
- Wiele innych

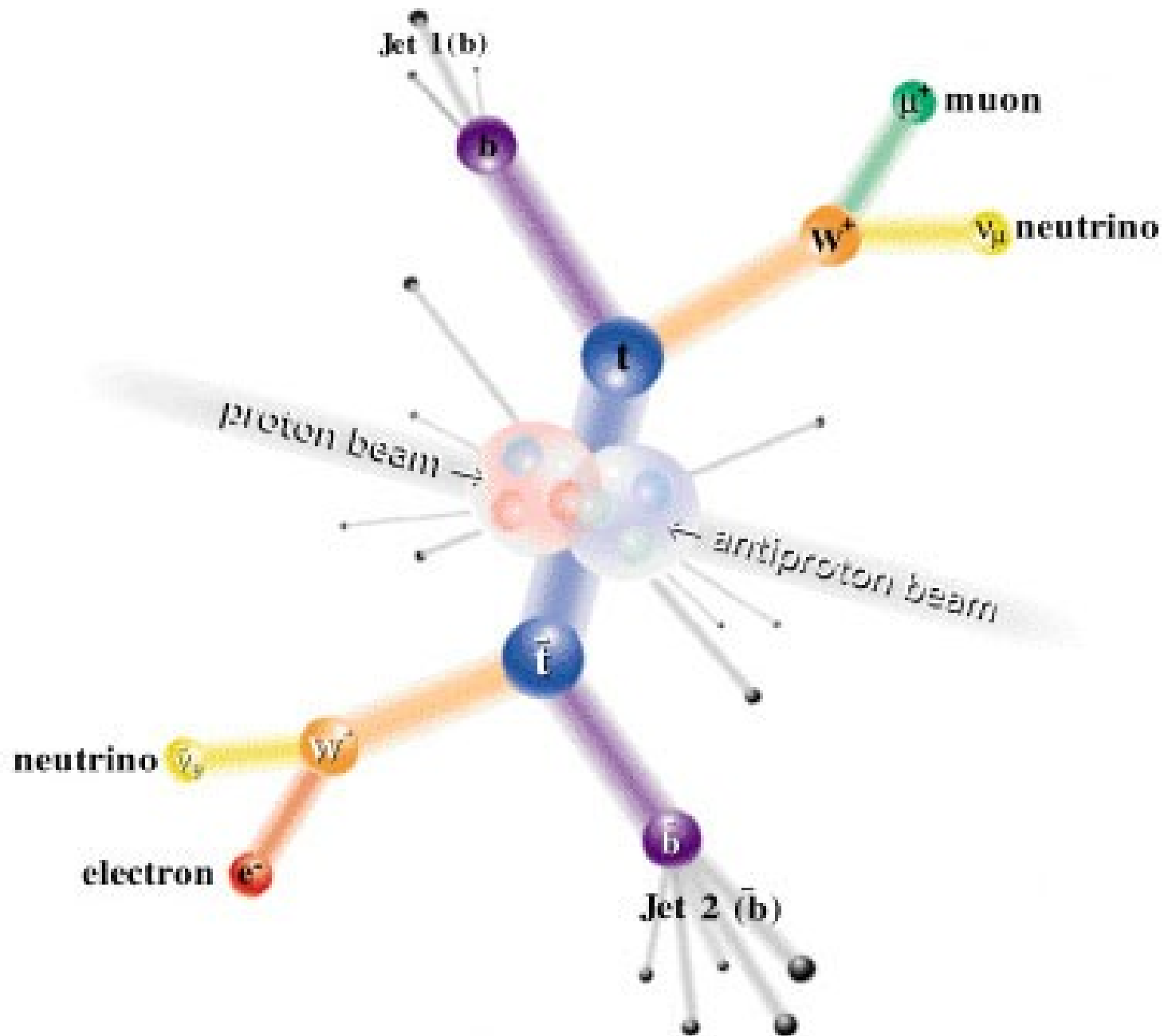
# Produkcja kwarku t...



- $\sigma(t\bar{t})=7.46\text{pb}$  ( $m_t=172.5\text{ GeV}$ )
- $\sigma(t)=3.46\text{pb}$  ( $m_t=170\text{ GeV}$ )
- Przewidywania silnie zależą od przyjętej masy t

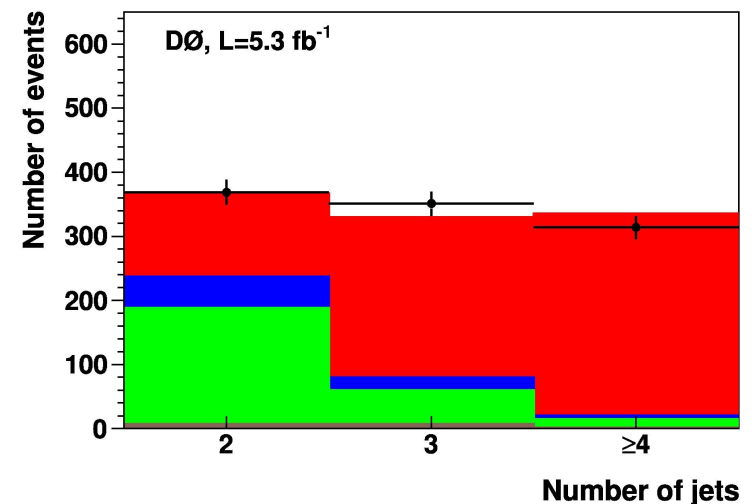
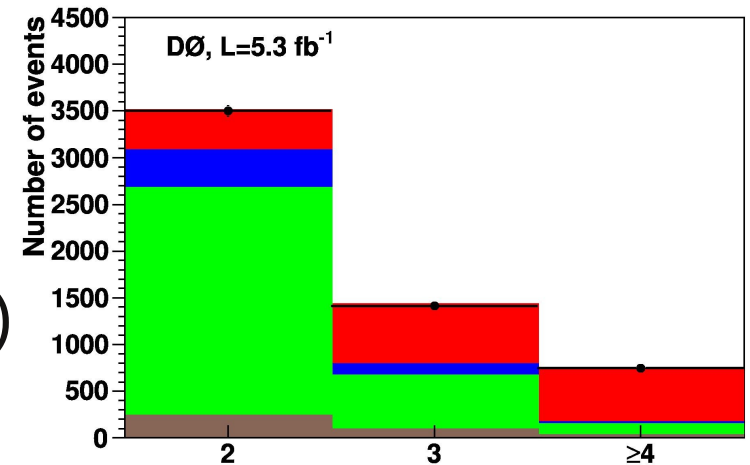
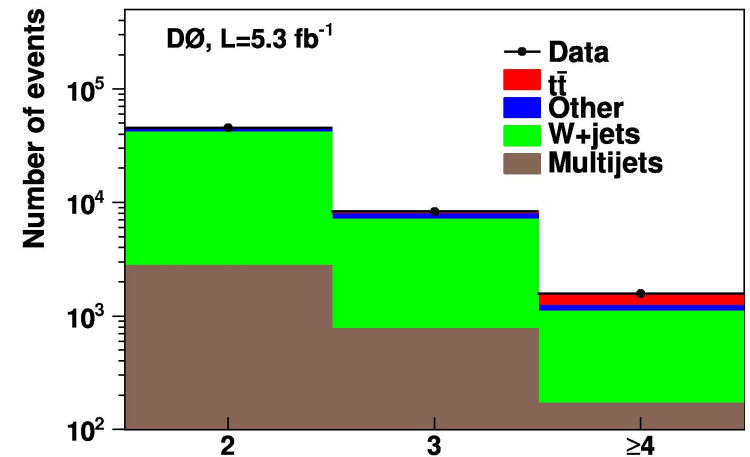
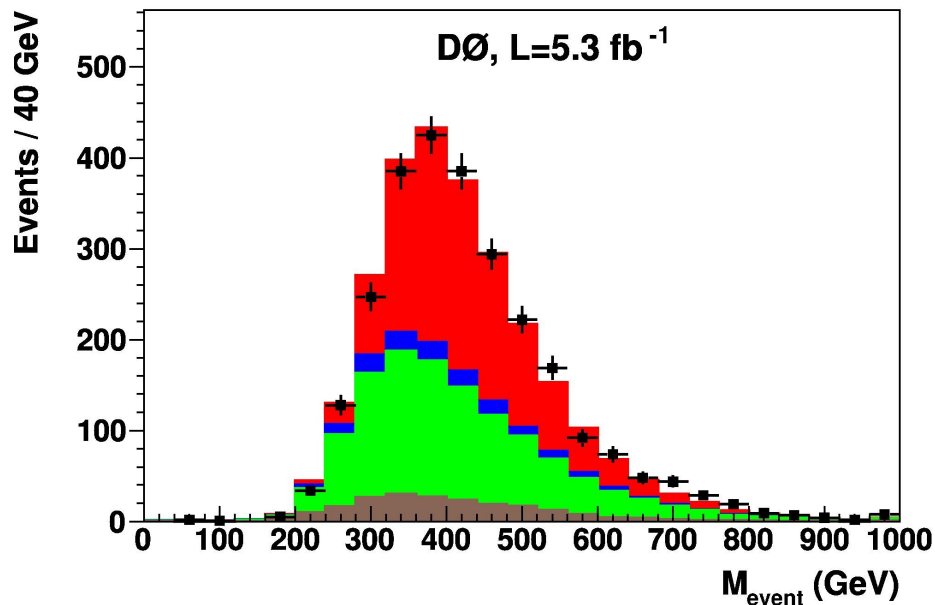


# ... i jeho rozpad

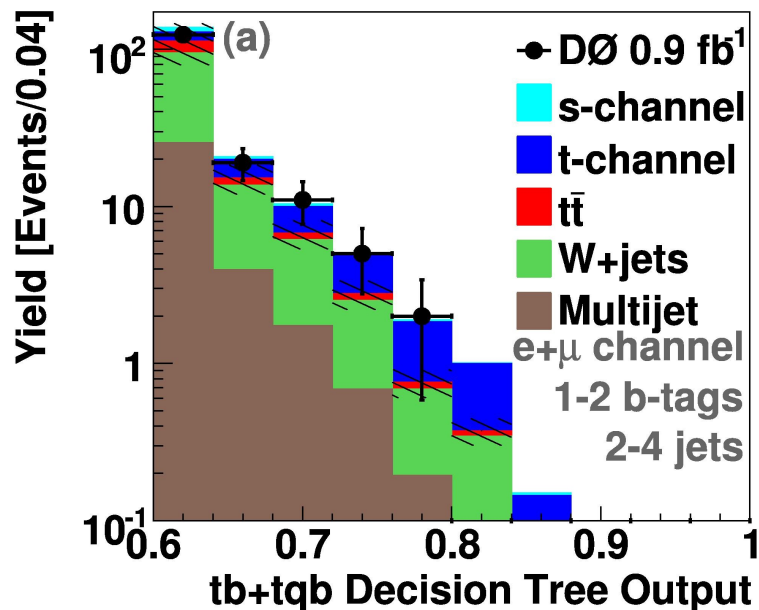


# Przekrój czynny na $t\bar{t}$

- "Measurement of the top quark production cross section in the lepton+jets channel in proton-antiproton collisions at  $\sqrt{s}=1.96$  TeV", arXiv:1101.0124
- $\sigma_{t\bar{t}} = 7.78 \pm 0.25 \text{ stat}^{+0.73}_{-0.59} \text{ sys pb}$
- Dobra zgodność z MS ( $\sigma^{\text{MS}}(t\bar{t}) \sim 7.46 \text{ pb}$ )



# Single top

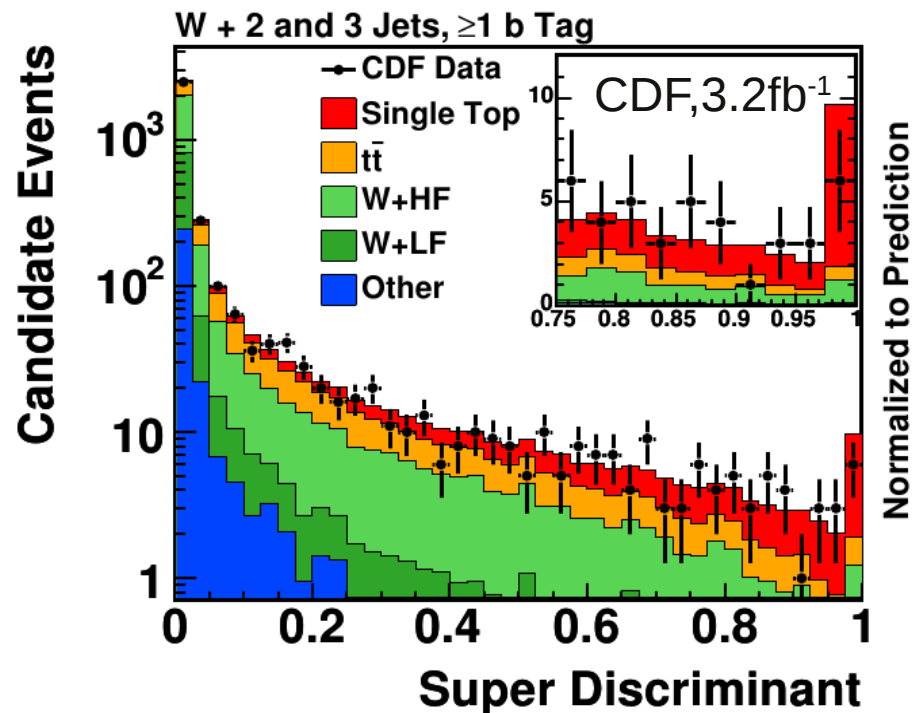


## Publikacje 3σ ("evidence"):

- D0 - Phys. Rev. D 78, 012005 (2008)
- CDF - PRL 101, 252001 (2008)

## Obserwacja (5σ):

- Trudne modelowanie tła, gorszy stosunek s/b (niż w tt̄)
- Ogromny nacisk na zgodność MC/dane
- Kombinacja kilku analiz MVA
- CDF - PRL 103 (2009),09202
- DO - PRL 103 (2009),09201

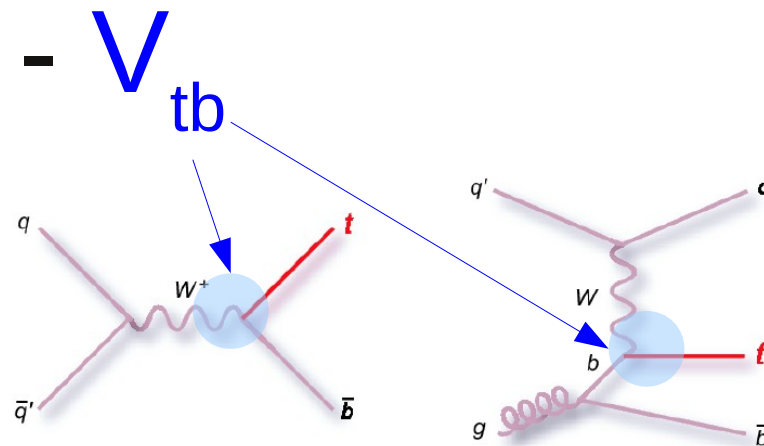


# Single top - $V_{tb}$

- Przekrój czynny pozwala określić  $|V_{tb}|$
- Przy założeniu małych  $|V_{ts}|$  i  $|V_{td}|$ :

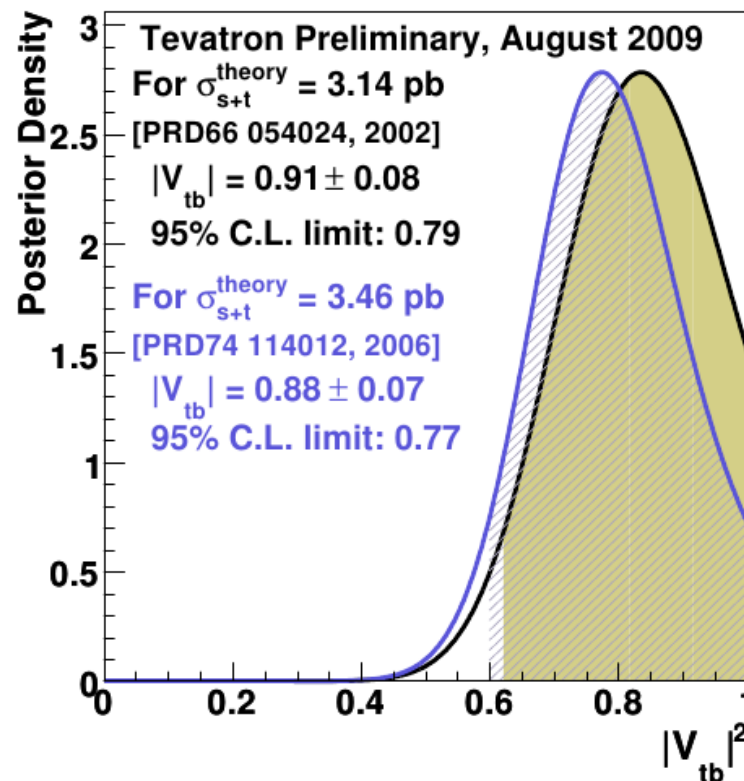
$$|V_{tb,meas}|^2 = \frac{\sigma_{meas}}{\sigma_{SM}} \cdot |V_{tb,SM}|^2$$

- $|V_{tb,meas}| = 0.88 \pm 0.07^{\text{stat,sys}} \pm 0.07^{\text{theory}}$
- Kombinacja wyników CDF i D0 - arXiv: 0908.2171



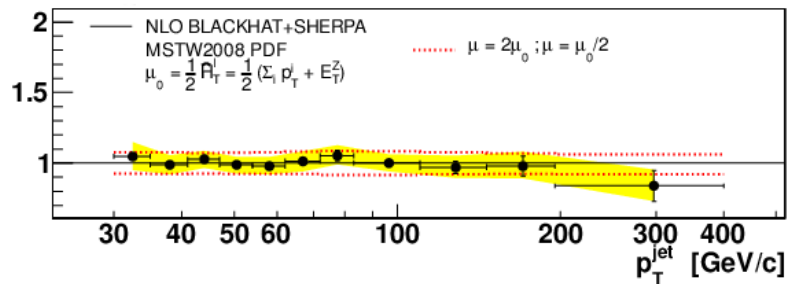
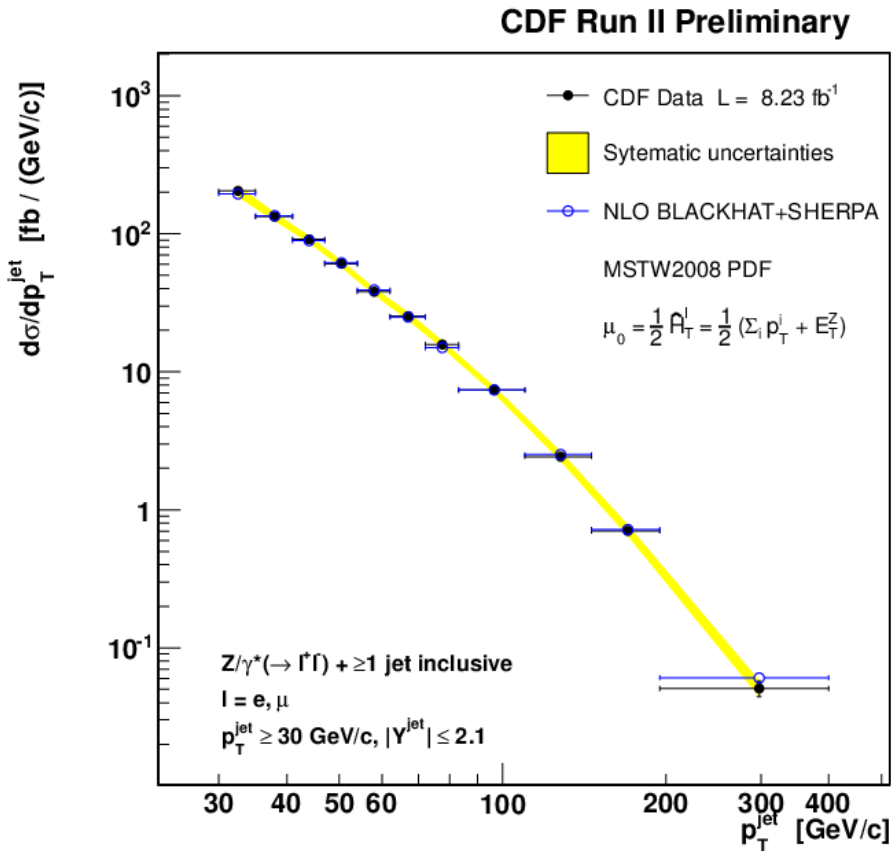
Drell-Yan  
s-channel

W-g fusion  
t-channel

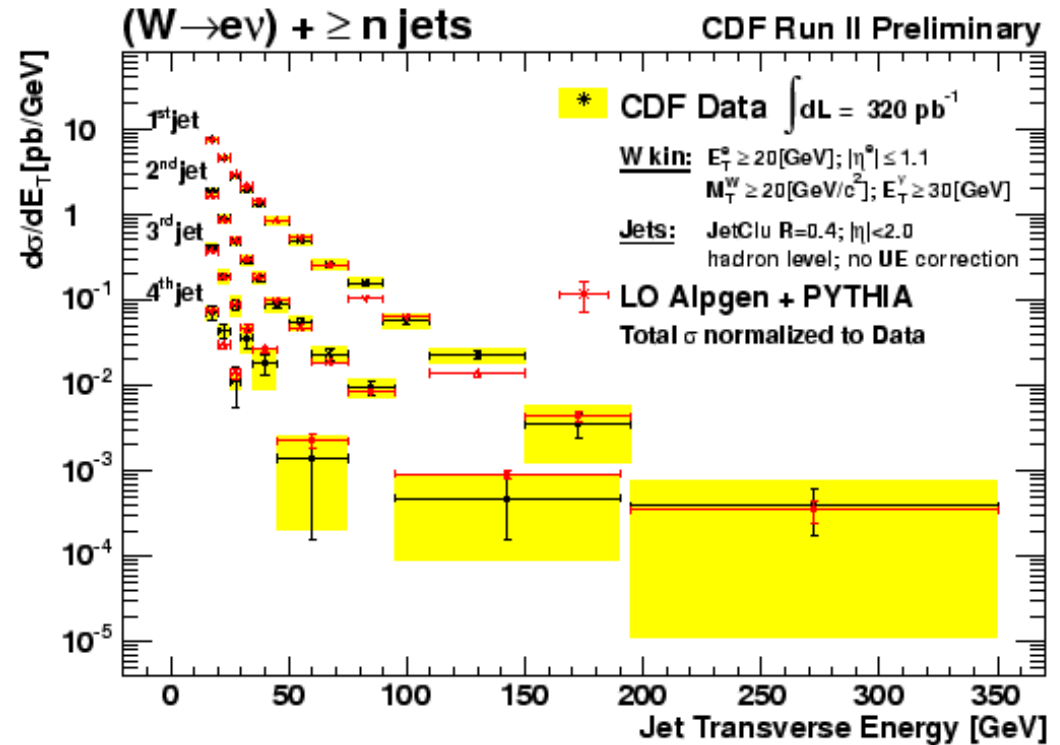


# Fizyka elektrosłaba - W,Z,WW,WZ,ZZ

# W,Z – testy pQCD



hep-ex/0711.4044



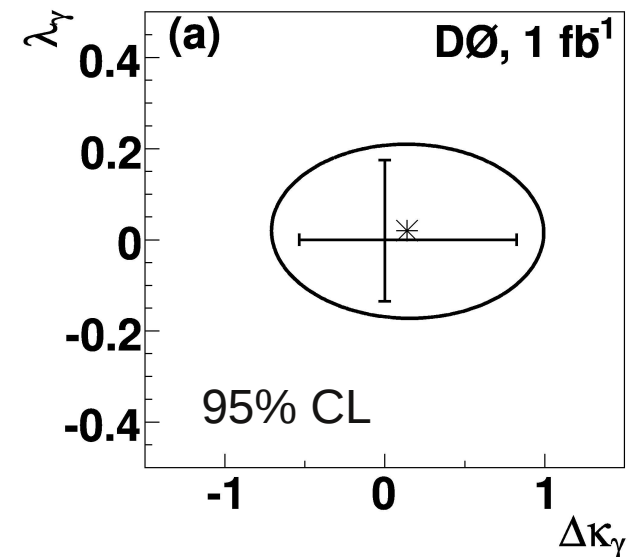
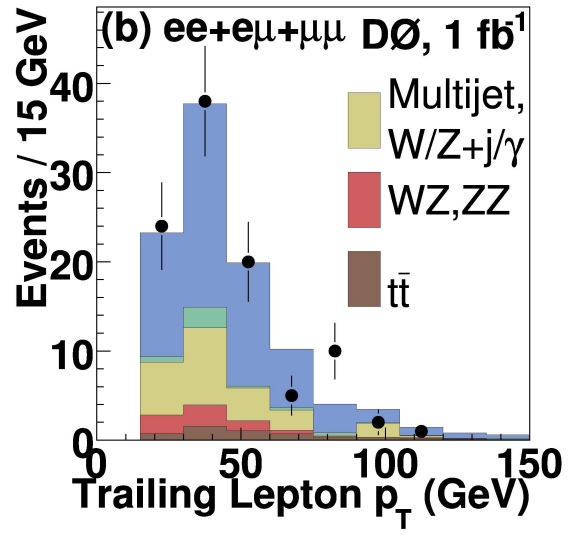
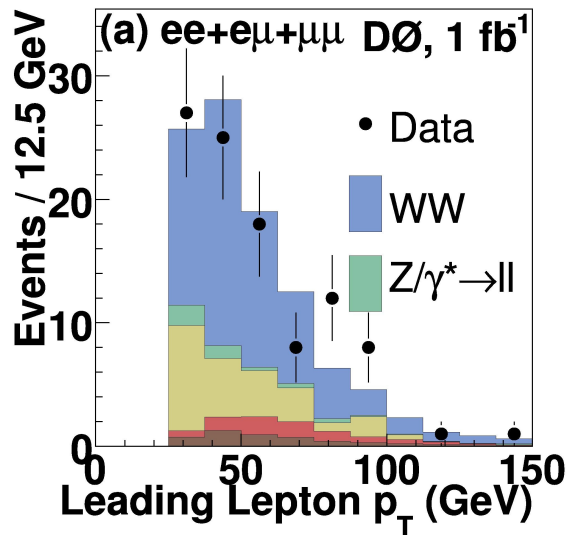
- Łatwe w selekcji, w przypadku kanałów mionowych praktycznie brak tła
- Doskonały do testów MS, w tym pQCD



# WW, WZ, ZZ

- WW, WZ, ZZ badane przez CDF i D0
- Ważne tło dla poszukiwań – np supersymetrii, Higgsa:
  - Jednocześnie – "próba generalna" przed poszukiwaniem Higgsa
- Kolejny test MS – część wierzchołków niedozwolona (w MS):
  - ZWW,  $\gamma$ WW, ZZZ, ZZ $\gamma$ , Z $\gamma\gamma$
  - ZZ $\gamma\gamma$ , WW $\gamma\gamma$ , WZ $\gamma\gamma$ , WWZZ, WWWW
  - Pojawienie się nowych wierzchołków – zmiana przekrojów czynnych (w tym - różniczkowych)

# Pomiar przekroju czynnego na WW



PRL 103:191801,2009

- Wyniki zgodne z przewidywaniami MS:

$$\sigma^{\text{meas}}(WW) = 11.5 \pm 2.1^{\text{stat,sys}} \pm 0.7^{\text{lumi}} \text{ pb}$$

$$\sigma^{\text{MS}}(WW) = 12 \pm 0.7 \text{ pb}$$

- Limity dla niedozwolonych sprzężeń (anomalous trilinear couplings, aTGC) przez porównanie różniczkowych przekroi czynnych w funkcji  $p_T$  leptonów (wiodącego i następnego w  $p_T$ )

# ZZ

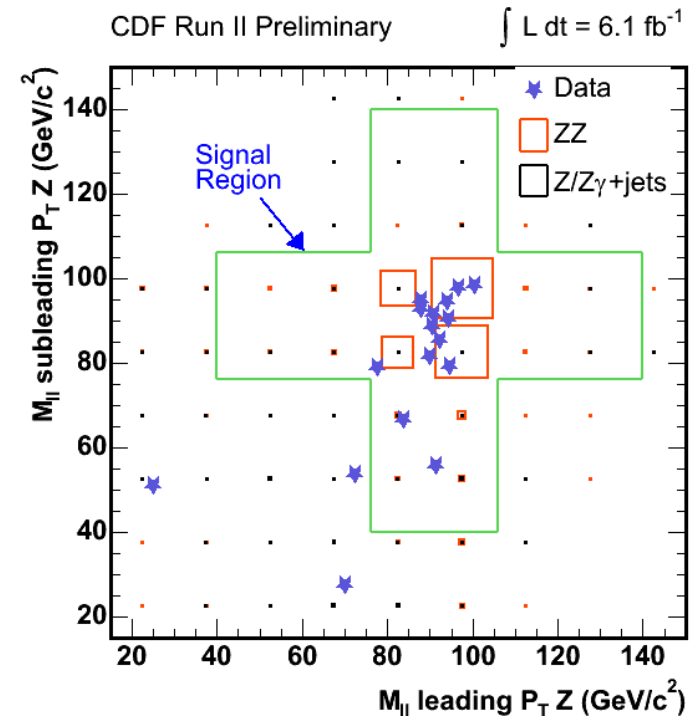
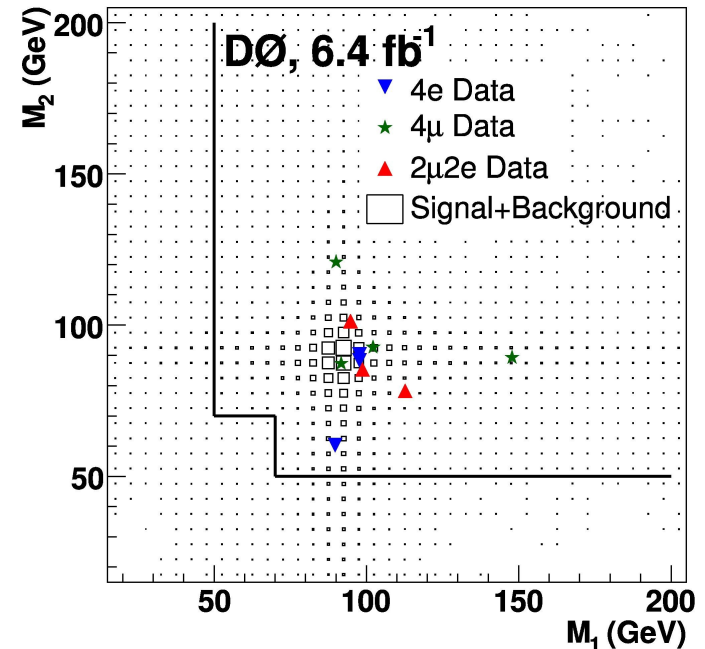
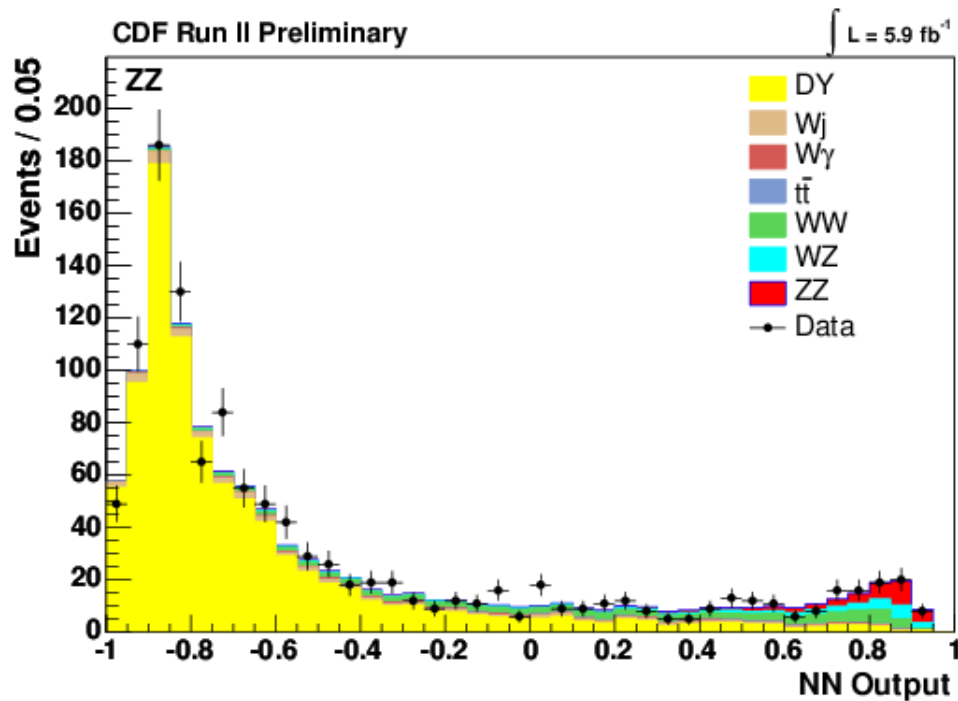
Kanał o najmniejszym przekroju czynnym,  $\sim 1\text{pb}$  (poza VH):

$$D0 (4l): 1.26^{+0.47}_{-0.37}(\text{stat}) \pm 0.11(\text{syst}) \pm 0.08(\text{lumi})$$

$$CDF (4l): 2.0 \pm 0.58(\text{stat}) \pm 0.32(\text{syst}) \pm 0.12(\text{lumi})$$

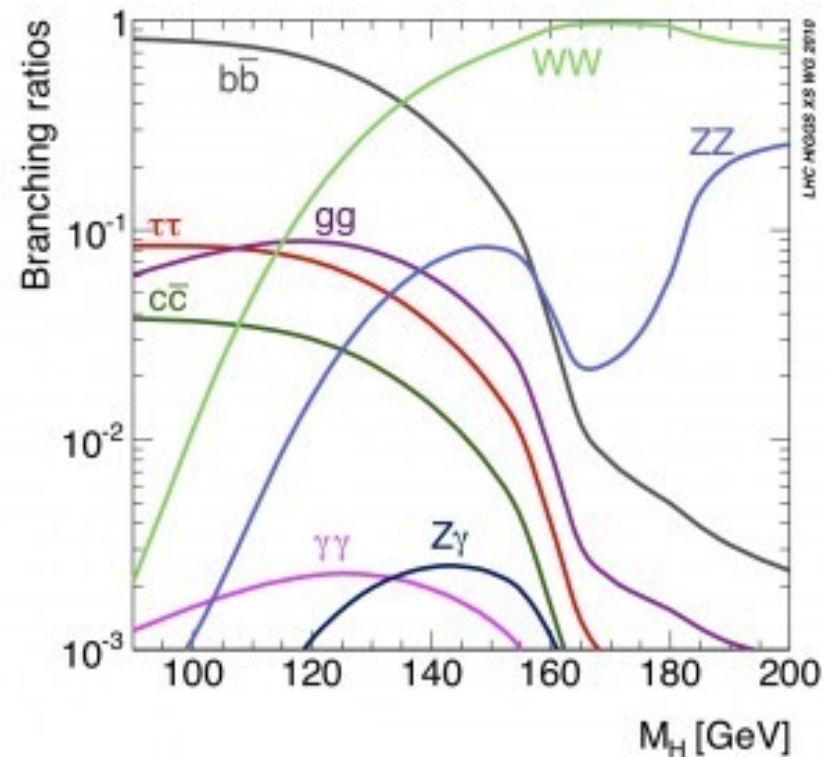
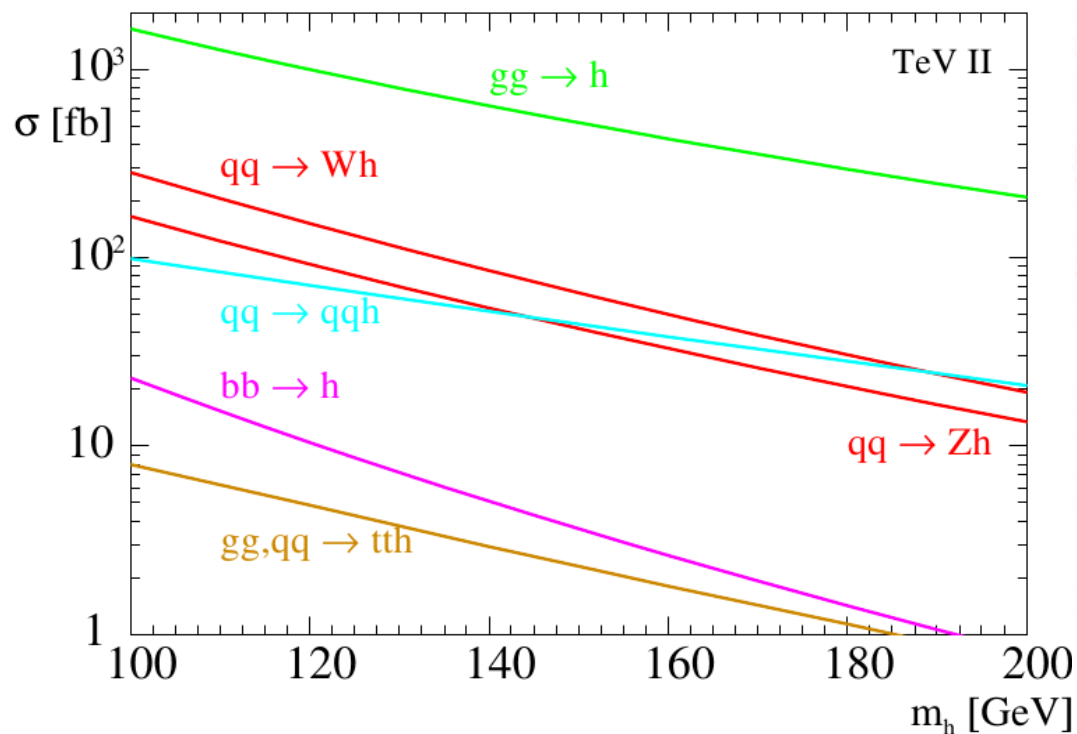
$$CDF (ll\nu\nu): 1.45^{+0.45}_{-0.42}(\text{stat})^{+0.41}_{-0.3}(\text{syst})$$

$$\text{Przewidywanie MS: } 1.21^{+0.05}_{-0.06} \text{ pb}$$



# Higgs

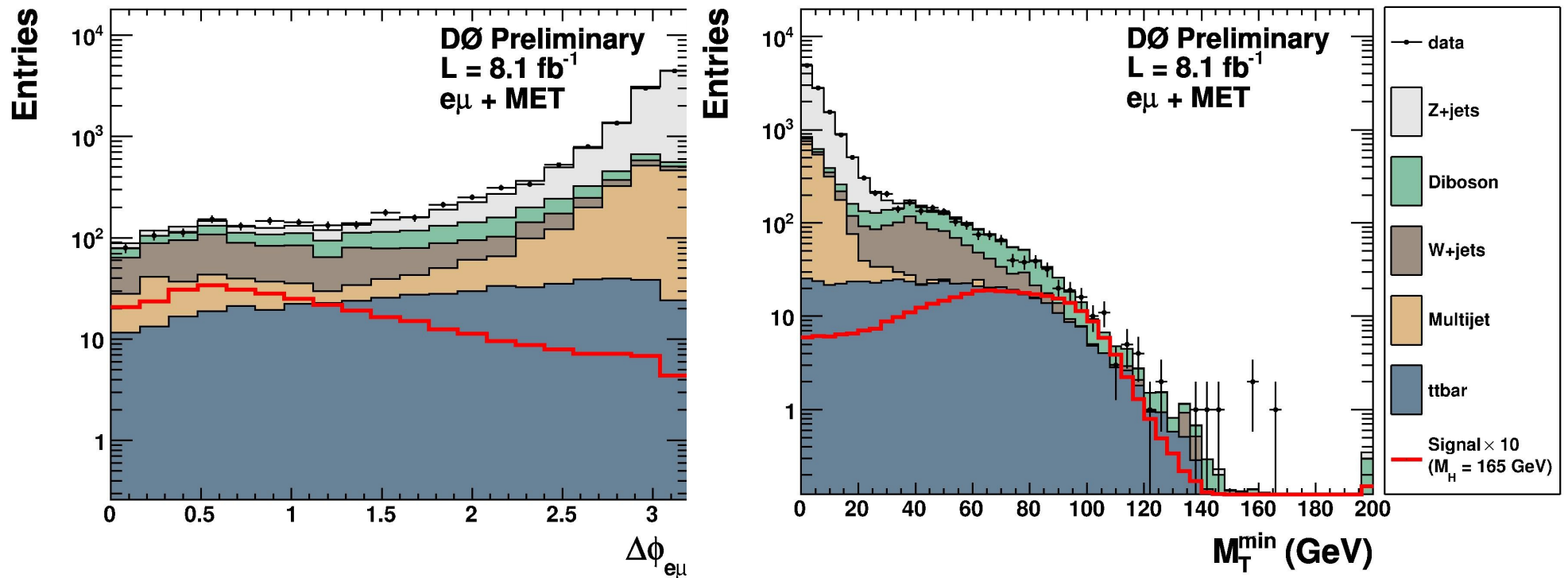
# Higgs w Tevatronie?



- Główny kanał produkcji – fuzja gluonowa, produkcja stowarzyszona

- Dla niskich mas –  $bb$  (trudne),  $\gamma\gamma$  i  $\tau\tau$  oraz  $WW$
- Wysokie masy –  $WW$ , uzupełniany przez  $ZZ$

# $H \rightarrow WW$ (D0)

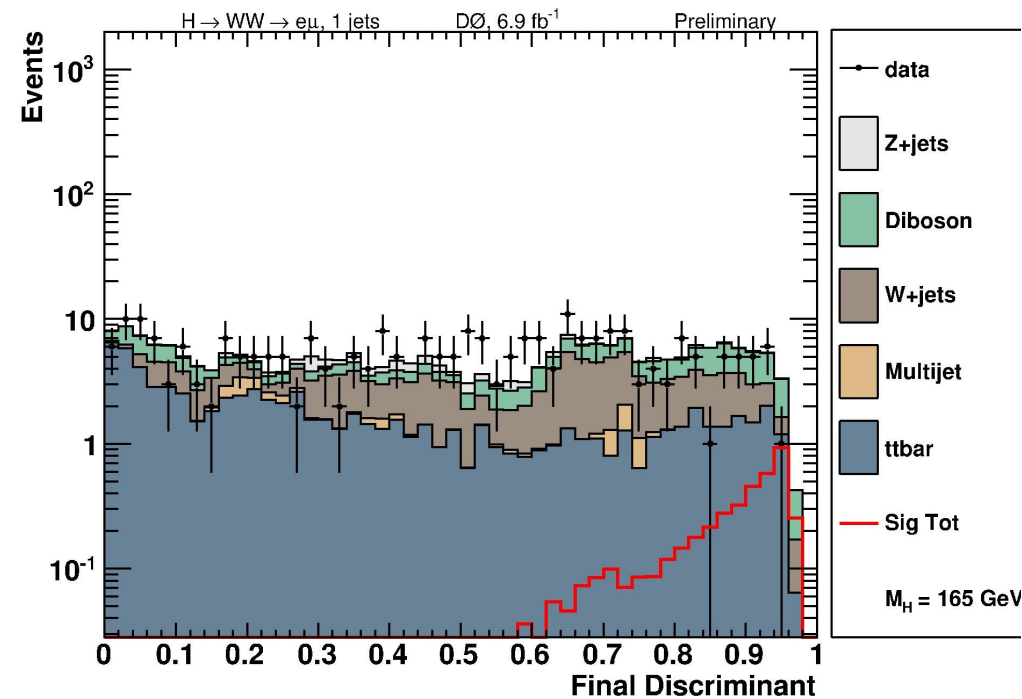
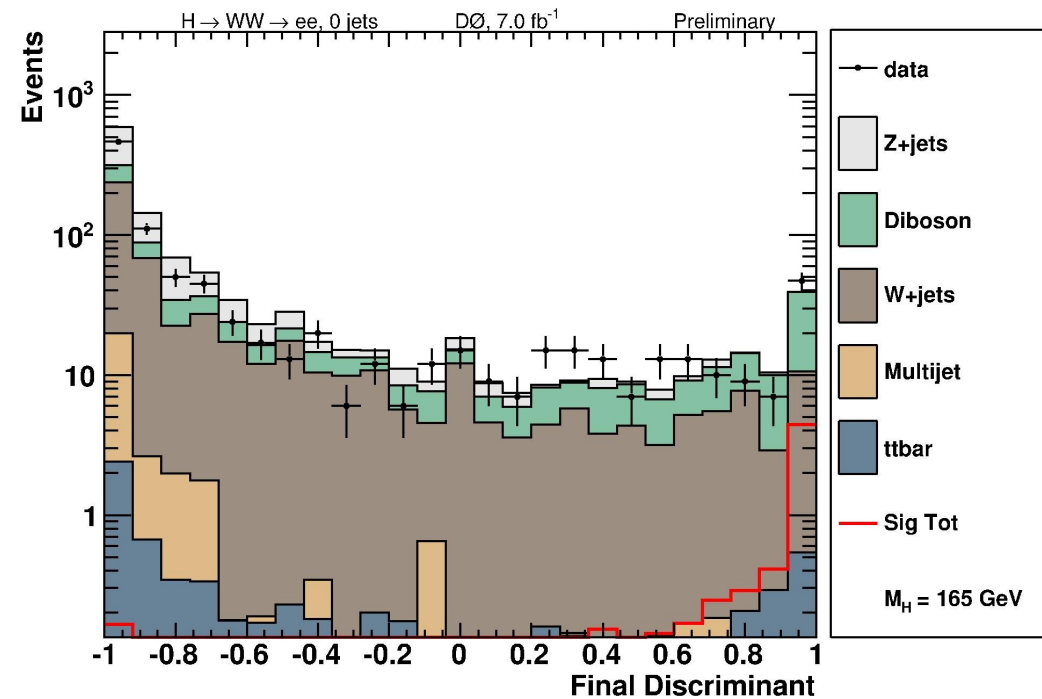


## 3 etapowa analiza:

D0 Note 6219-CONF

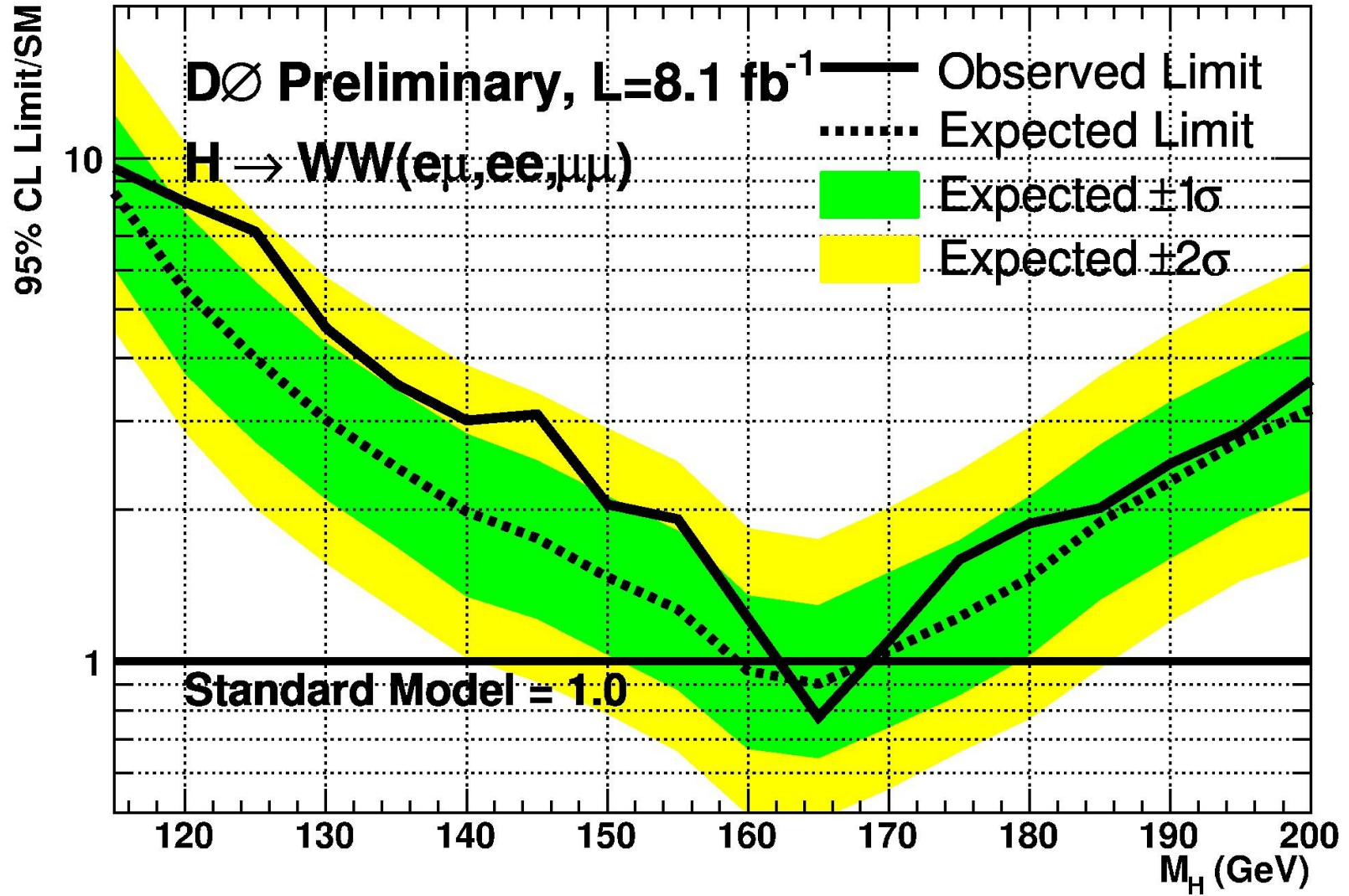
1. Preselekcja (np tryger,  $p_T l$ )
2. Selekcja BDT (Boosted Decision Tree)
3. Końcowa selekcja BDT z wyłączeniem problematycznych regionów

# $H \rightarrow WW$ (D0)



- Dla przypadków "0 jet" problem z modelowaniem fałszywych leptonów (kanały ee,  $\mu\mu$ ) w tle Z+jets
  - Wymaganie BDT > -0.75

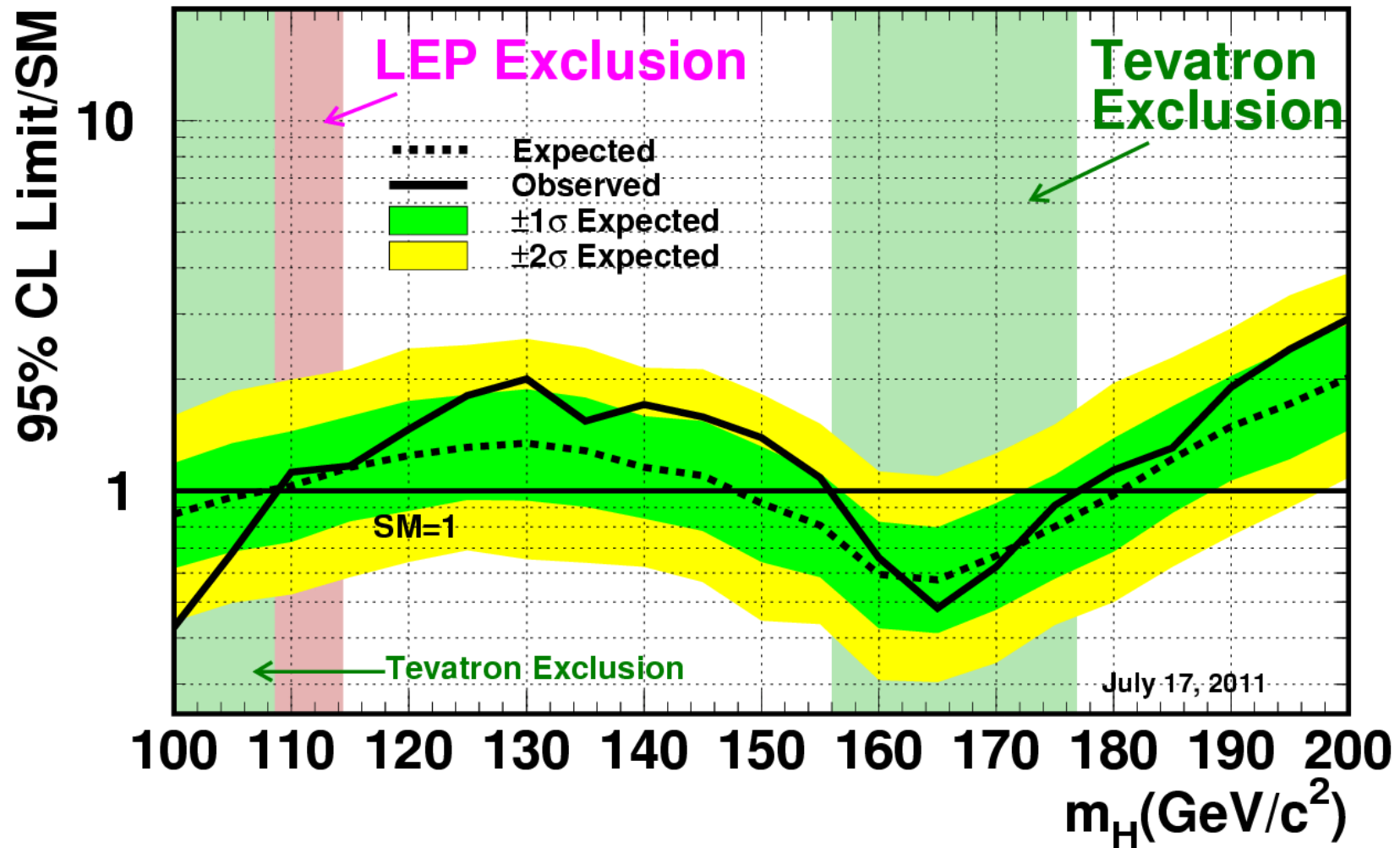
# $H \rightarrow WW$ (D0)





# Tevatron – podsumowanie wyników Higgsa (CDF + D0)

Tevatron Run II Preliminary,  $L \leq 8.6 \text{ fb}^{-1}$

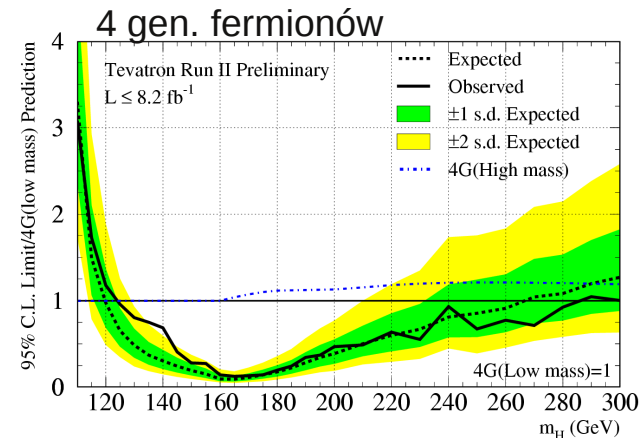
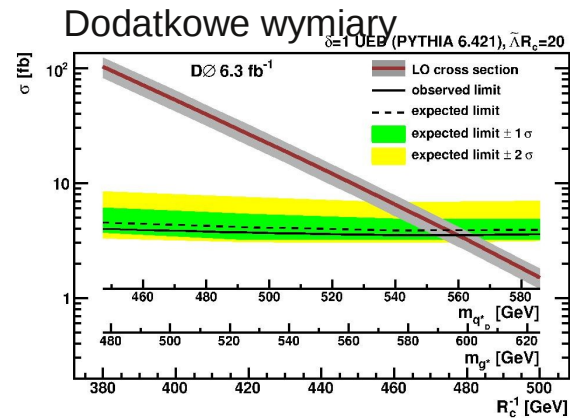
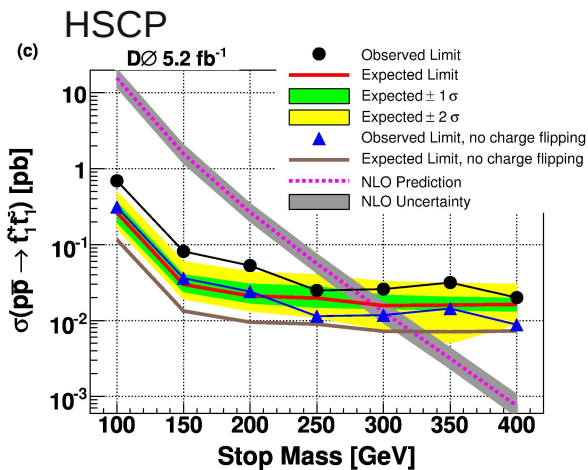


# "Nowa" fizyka

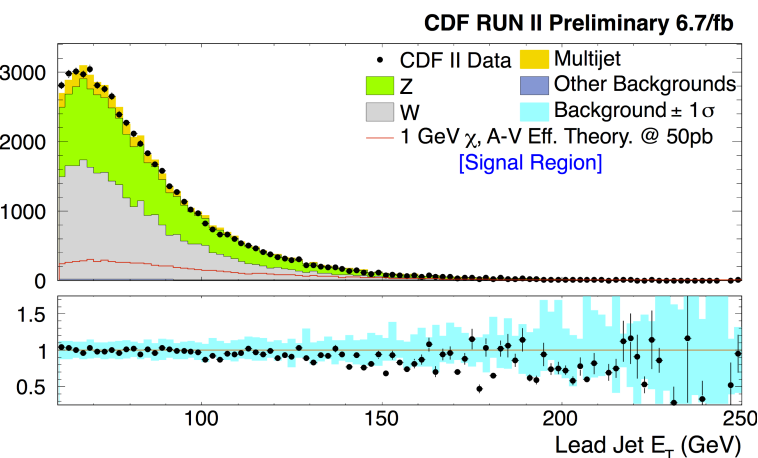
„315 Physicists Report Failure In Search for Supersymmetry“

The New York Times  
5 stycznia 1993

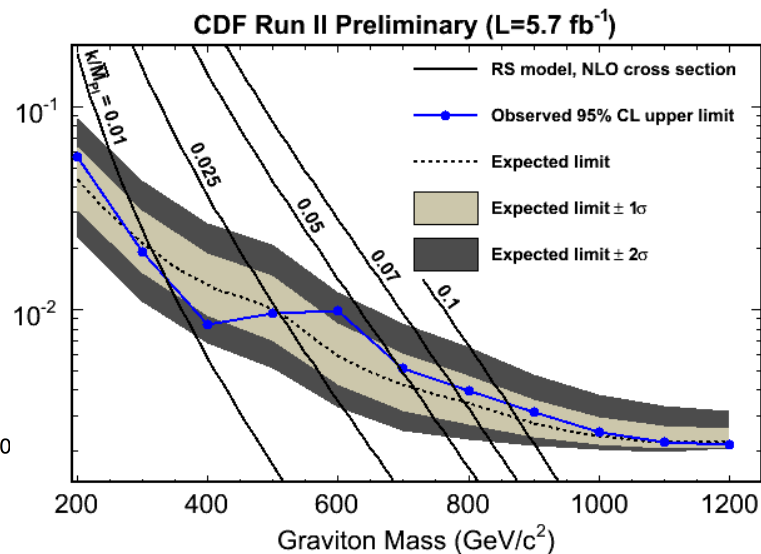
# Poszukiwania nowej fizyki



## Poszukiwanie ciemnej materii

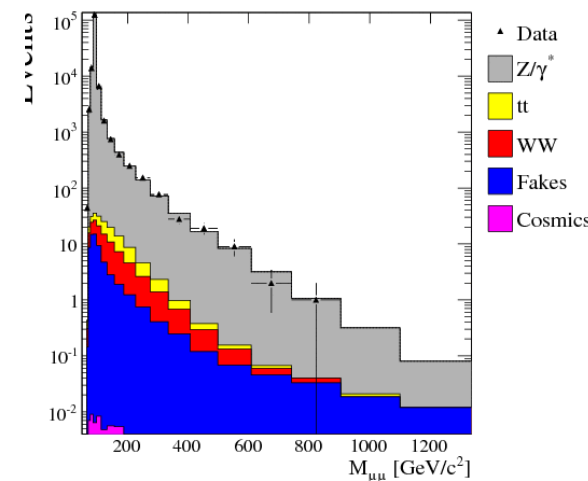


## Grawitony



## Poszukiwanie Z'

CDF Run II Preliminary 4.6 fb<sup>-1</sup>

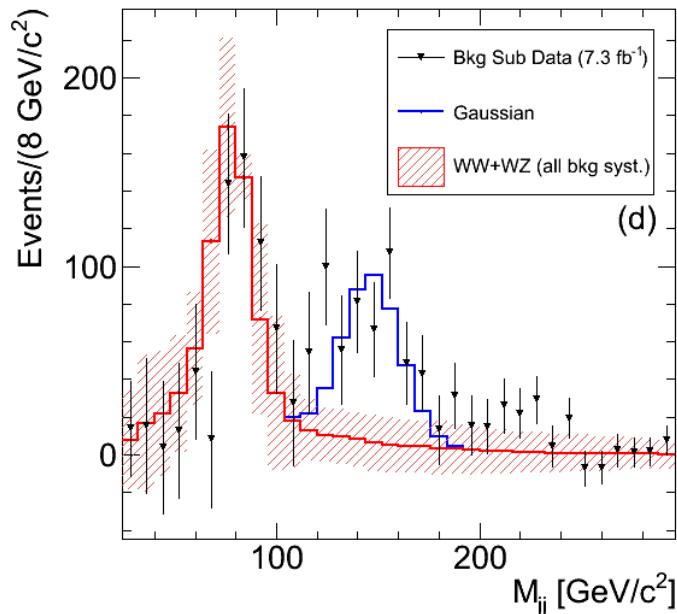
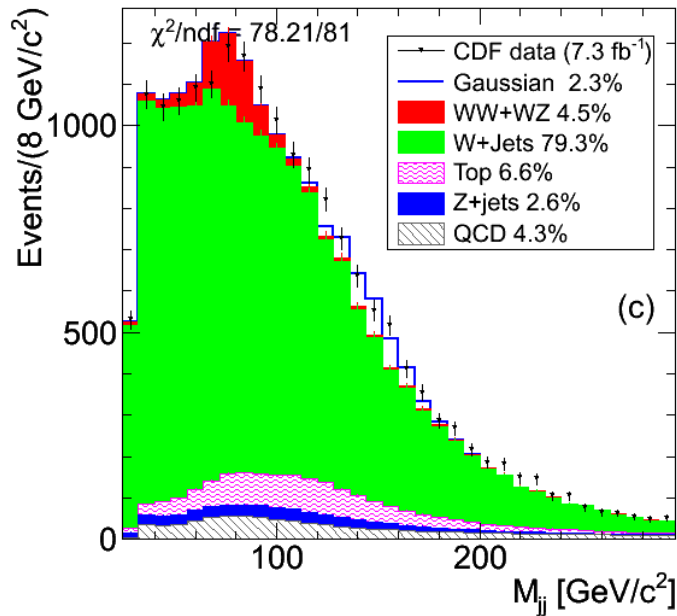


...oraz mnóstwo innych



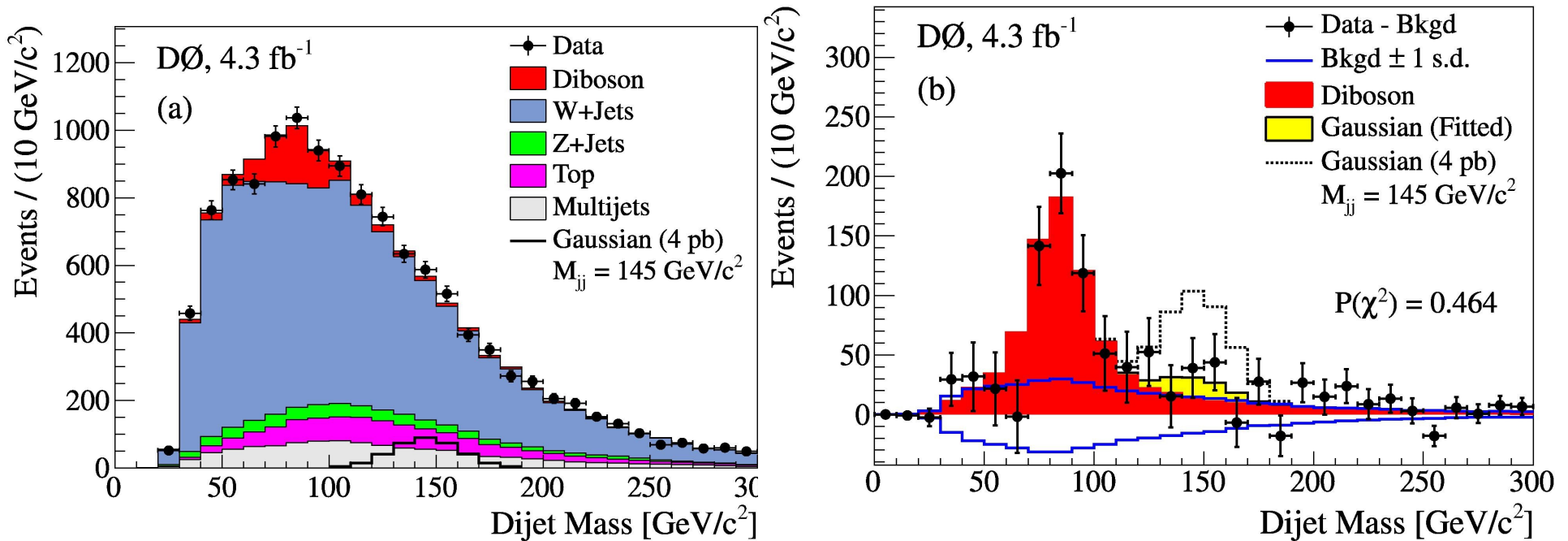
*Im bardziej Puchatek zagłądał do środka,  
tym bardziej Prosiaczka tam nie było.*

# W+jj w CDF



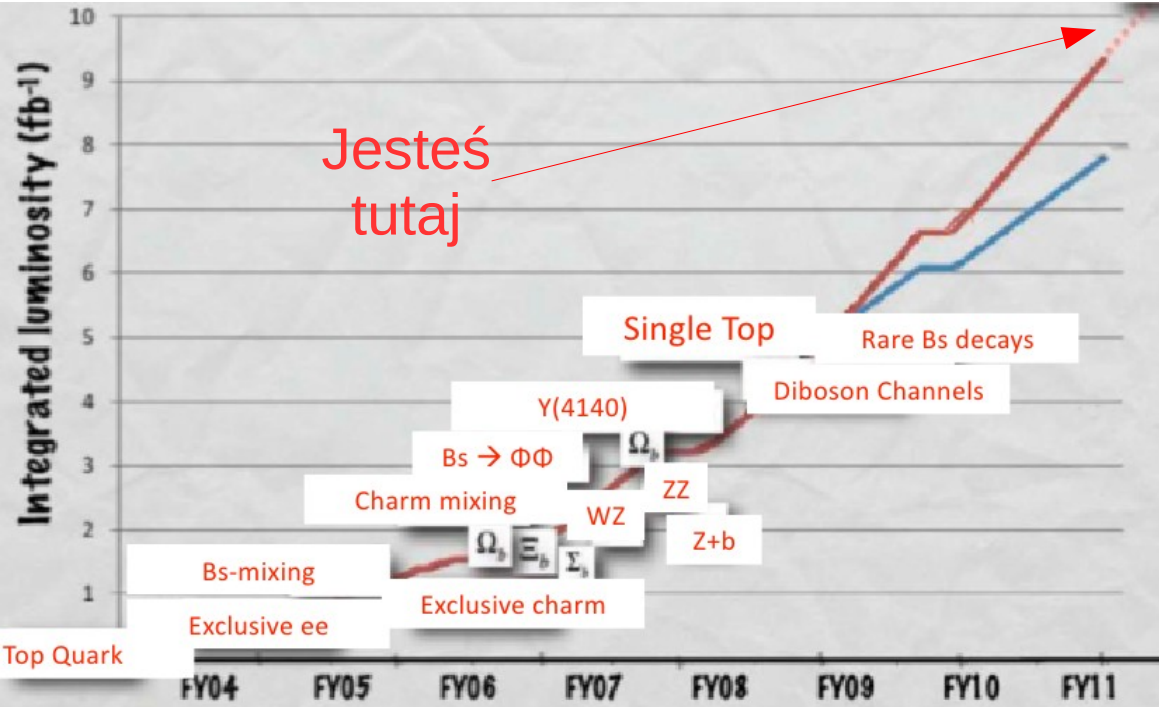
- Efekt  $4.1 \sigma$  widoczny w rozkładzie masy dwóch dżetów dla selekcji W+2dżety (izolowany lepton o  $p_T > 20$  GeV, masa poprzeczna  $m_T > 30$  GeV)
- Nadwyżka  $156 \pm 42$  (kanał elektronowy),  $97 \pm 38$  (kanał mionowy)  $\rightarrow$  przekrój czynny na poziomie 4 pb,  $\sim 300$  razy większy, niż przewidywany dla stowarzyszonej produkcji Higgosa (WH)
- [http://www-cdf.fnal.gov/physics/ewk/2011/wjj/7\\_3.html](http://www-cdf.fnal.gov/physics/ewk/2011/wjj/7_3.html) oraz PRL 106, 171801 (2011)

# W+jj w D0



- Analiza CDF dokładnie powtórzona przez D0 – ta sama przestrzeń fazowa, to samo modelowanie tła
- Wynik D0 zgodny z MS
- Dla  $M_{jj} = 145 \text{ GeV}$  wykluczenie  $\sigma > 1.9 \text{ pb}$  @95%CL

# Zamiast podsumowania



- D0 - uaktualnienia analiz (dla większej świetlności) zwykle publikowane jako noty (publiczne) lub publikacje konferencyjne.
  - Nowe analizy – publikacje recenzowane (np w Physical Review)
- D0: 250 publikacji (bez konferencyjnych oraz not), w tym:
  - analizy powyżej 6fb<sup>-1</sup>–15 publikacji, >7fb<sup>-1</sup>–9, >8fb<sup>-1</sup>–4, >9fb<sup>-1</sup>–1
- **Doskonale zrozumiane detektory, dużo dostępnych danych. Jednocześnie coraz mniej ludzi. Czy będziemy słyszeć jeszcze o Tevatronie?**