Poszukiwania bozonu Higgsa w Tevatronie

Mikołaj Ćwiok

IFD UW

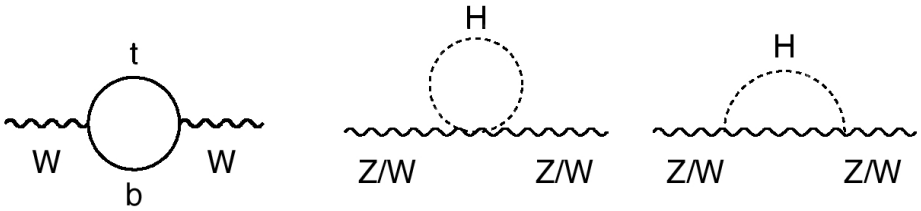
3 października 2008

Plan

1. Co wiemy o masie Higgsa?
2. Eksperymenty przy Tevatronie
   - Tevatron
   - CDF
   - DØ
3. Bozon Higgsa w Modelu Standardowym
   - Produkcja i rozpady
   - Strategia poszukiwań
   - $m_H < 135\,\text{GeV}$
   - $m_H > 135\,\text{GeV}$
   - Kombinacja CDF+DØ
4. Higgs poza Modelem Standardowym
   - Neutralny Higgs
5. Podsumowanie

Co wiemy o m_H w SM?

- Precyzyjne pomiary stałych elektrosłabych są czułe na m_H poprzez poprawki radiacyjne:



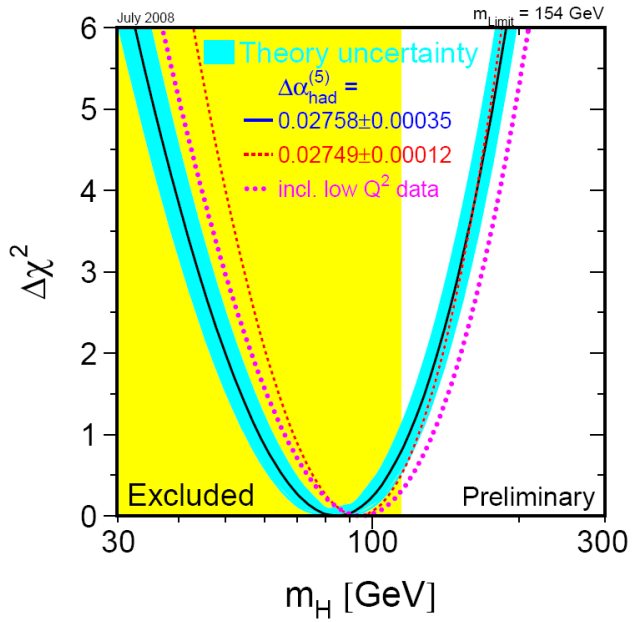
- Globalny fit EW :

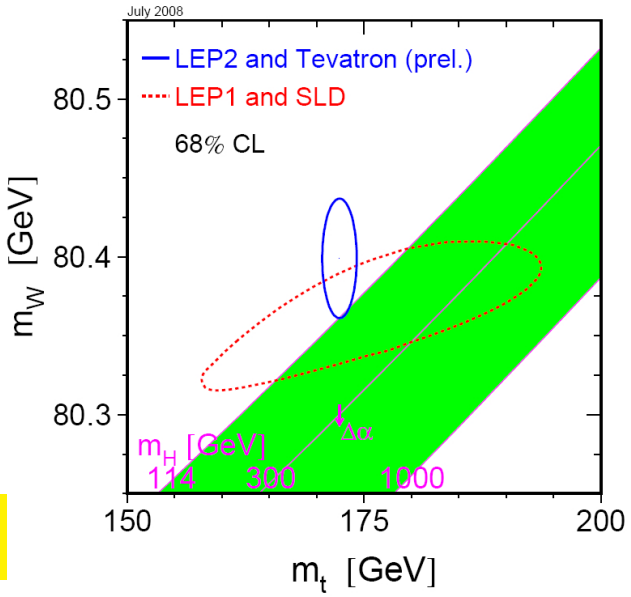
  $m_H = 84^{+34}_{-26}\,\text{GeV}$

  $m_H < 154\,\text{GeV}$ @ 95 % C.L.

- Bezpośrednie pomiary w LEP :

  $m_H > 114.4\,\text{GeV}$ @ 95 % C.L.

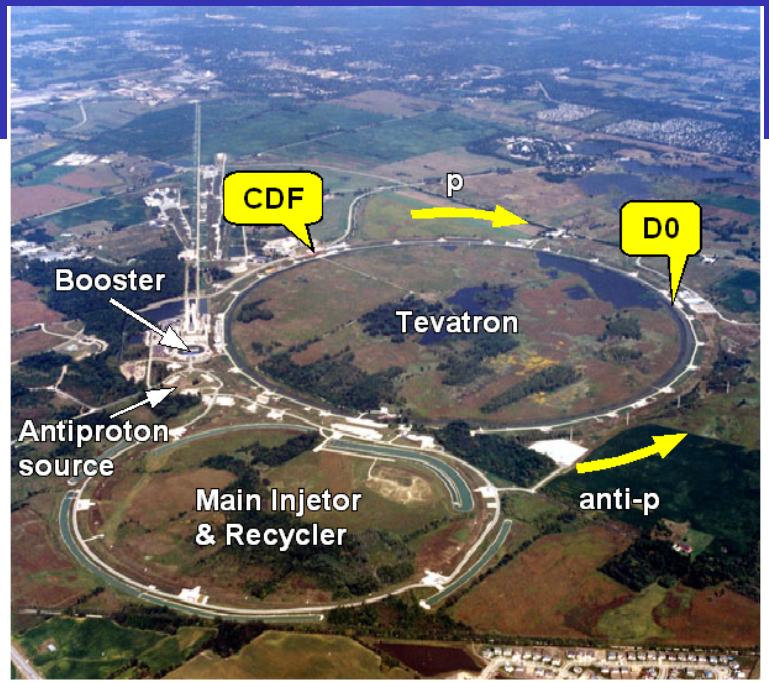




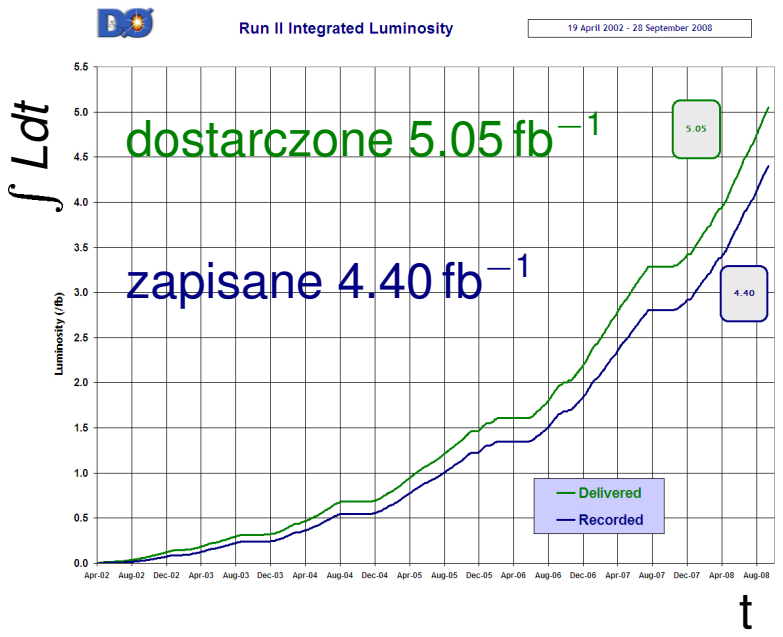
Dane wskazują na lekki bozon Higgsa w SM

Tevatron

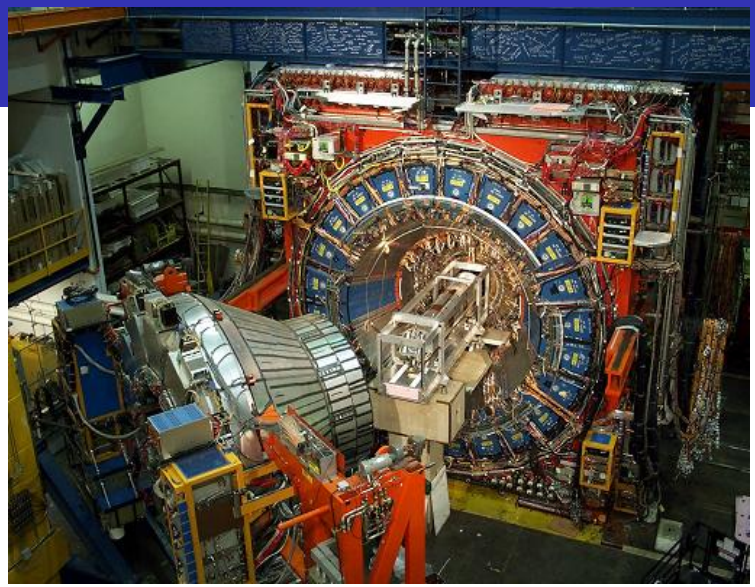
- Run II (2002-2009) : zderzenia $p\bar{p}$ przy $\sqrt{s} = 1.96\,\text{TeV}$
- $\sigma_{inelastic} \sim 50\,mb$, $\sigma_{top} \sim 7\,pb$
- maksymalna, początkowa świetlność $L \approx 3 \cdot 10^{32}\,\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
- przecięcia wiązek co 396 ns, 2-3 oddziaływania na przecięcie
- dwa detektory: CDF i DØ



- dostarczona, scałkowana świetlność $\approx 5\,\text{fb}^{-1}$/eksperyment
- każdy z eksperymentów ma na taśmie $> 4\,\text{fb}^{-1}$
- prezentowane wyniki dotyczą **$1 - 3\,\text{fb}^{-1}$**

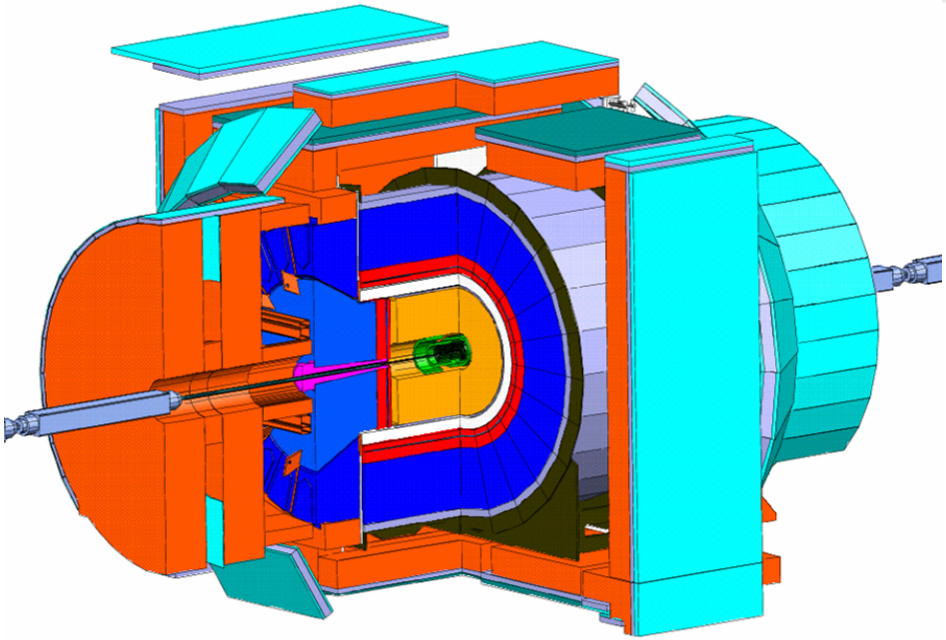


Collider Detector at Fermilab



Detektor śladowy

- Si microstrip + komora wielodrutowa
- wewnątrz solenoidu 1.5 T
- Silicon Vtx Detector : 6 warstw, $|\eta| < 2$
- Intermediate Silicon Layer : $1 < |\eta| < 2$
- Central Outer Tracker : $|\eta| < 1$



Kalorymetr

- Pb/Fe + scyntylatory
- pokrywa $|\eta| < 3.6$

System mionowy

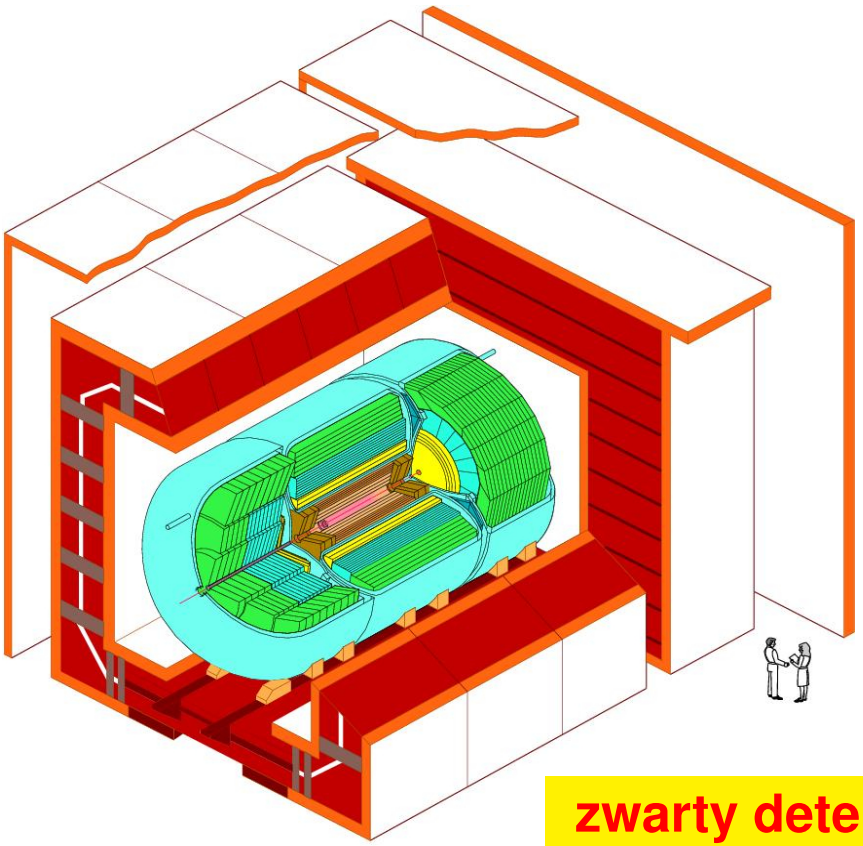
- scyntylatory + komory dryfowe
- pokrywa $|\eta| < 1.5$

duży detektor śladowy, tryger wtórnego wierzchołka

DØ

Detektor śladowy

- Si microstrip + włókna scyntylacyjne
- wewnątrz solenoidu 2 T
- pokrywa $|\eta| < 3$



Kalorymetr

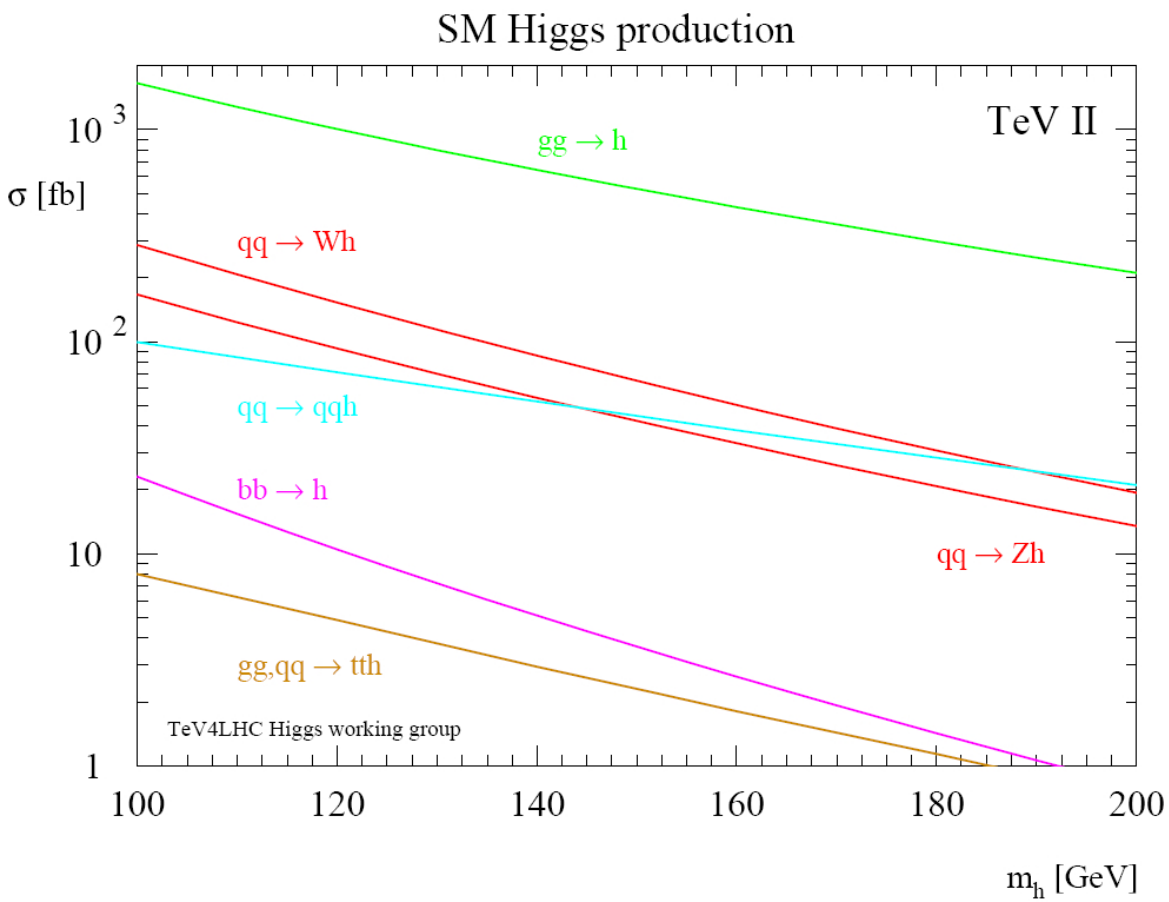
- U + ciekły Ar
- hermetyczny, pokrywa $|\eta| < 4.2$

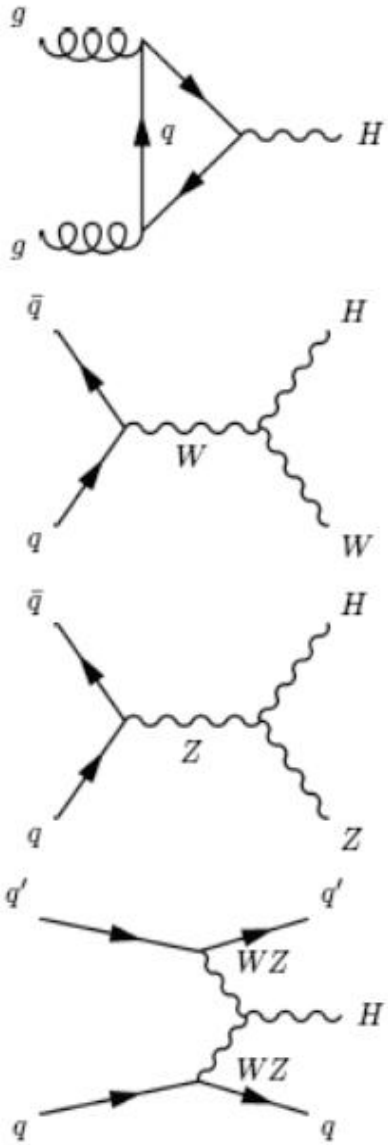
System mionowy

- komory dryfowe + scyntylatory
- przed i za toroidem 1.8 T
- pokrywa $|\eta| < 2$

zwarty detektor śladowy, dobry system mionowy

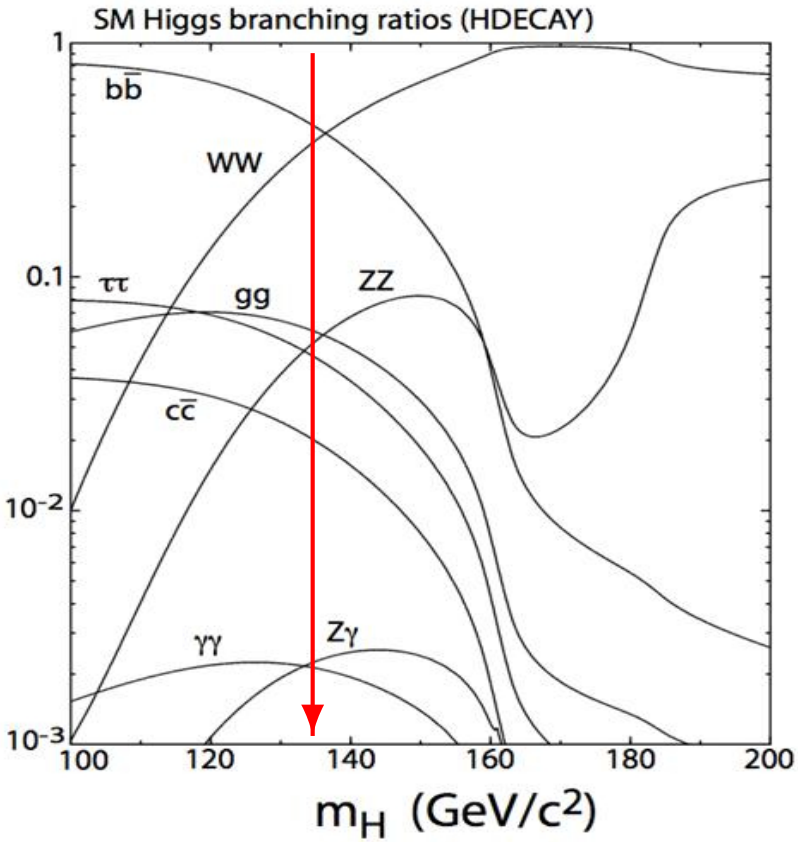
SM : Produkcja H w Tevatronie





- $\sigma(p\bar{p} \to H + X) \approx 1\,\text{pb}$ dla $m_H = 115\,\text{GeV}$
- dominuje : $gg \to H$
- domieszka : WH, ZH

SM : Kanały rozpadu H



dominujący kanał
$gg \to H \to b\bar{b}$
ma zbyt duże tło od QCD

Lekki Higgs : $m_H < 135\,\text{GeV}$

- $BR(H \to b\bar{b}) = 73\,\%$
  dla $m_H = 115\,\text{GeV}$
- najbardziej obiecujące kanały:
  $WH \to \ell\nu b\bar{b}$
  $ZH \to \ell\ell b\bar{b},\ \nu\nu b\bar{b}$
- dodatkowe kanały:
  $WH \to \tau\nu bb$ $\quad$ $WH \to WWW^\star$
  $WH, ZH \to qqbb$ $\quad$ $ttH \to \ell\nu bbbbqq$
  $(H \to \tau\tau) + jj$

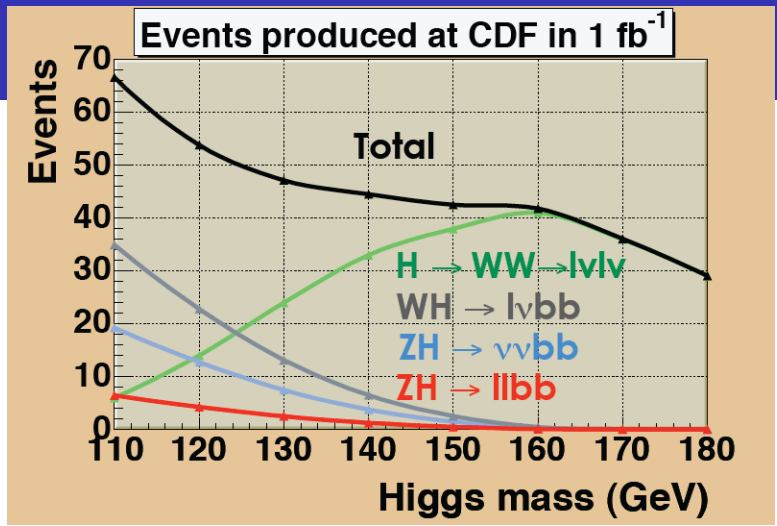
Ciężki Higgs : $m_H > 135\,\text{GeV}$

- $BR(H \to WW) = 90\,\%$
  dla $m_H = 160\,\text{GeV}$
- najbardziej obiecujący kanał:
  $gg \to H,\ H \to WW^\star \to \ell\ell\nu\nu$

SM : Strategia poszukiwań

$\frac{\sigma_H}{\sigma_{t\bar{t}}} \sim 3\,\% - 30\,\% \Rightarrow$ rzadki proces

stany końcowe z b lub $\ell \Rightarrow$ redukcja tła



Tryger

- e, $\mu \Rightarrow$ duże p_T
- $\tau \Rightarrow$ Tor + $\not\!\!E_T$ + E_{CALO}
- $\not\!\!E_T$ + dżety

Rekonstrukcja

- identyfikacja: ℓ i b
- rozdzielczość: E_j, M_{jj}, $\not\!\!E_T$

Oddzielenie sygnału od tła

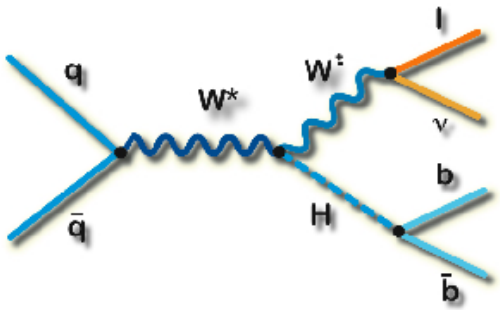
- wyznaczanie tła z danych doświadczalnych
- zaawansowane techniki wieloparametrowe:
  Neural Networks (NN)
  Matrix Elements (ME)
  Boosted Decision Trees (BDT)

Poprawa czułości

- zwiększenie akceptacji:
  luźne kryteria na b-id oraz ℓ-id
  słabsze cięcia kinematyczne
  wykorzystanie zapasowych trygerów
- kombinacja wielu kanałów z uwzględnieniem wzajemnych korelacji

SM : $WH \to \ell\nu b\bar{b}$

$\sigma(WH \to \ell\nu b\bar{b}) \approx 30\,\text{fb}$, $\ell = e, \mu$
3-4 przypadki / 1 fb^{-1}



Tło

Wbb, *Wcc*, *Wjj*, $t\bar{t}$, *multijet*

Opis modelowy (DØ)

- PYTHIA $\Rightarrow$ sygnał
- ALPGEN $\Rightarrow$ W/Z+jets
- MCFM $\Rightarrow$ względna normalizacja
- Dane przed znakowaniem b $\Rightarrow$ próbka kontrolna, normalizacja

Pre-selekcja (CDF)

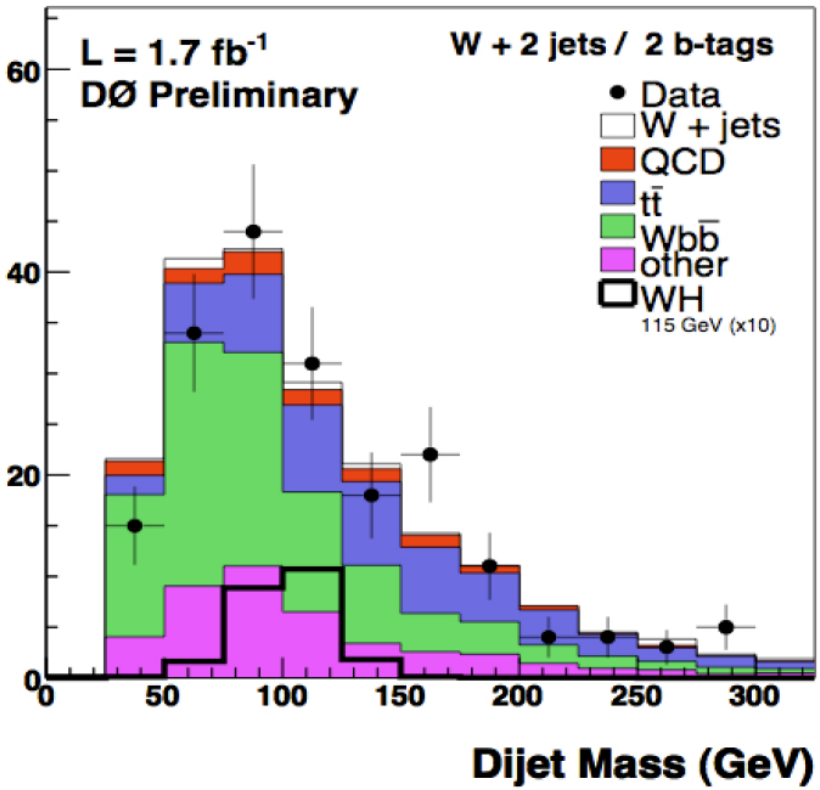
- 1 lepton o $p_T > 20\,\text{GeV}$
- $\not\!\!E_T > 20\,\text{GeV}$
- 2 dżety o $p_T > 15\,\text{GeV}$
- $\geqslant 1$ dżet z kwarkiem b

Końcowa selekcja

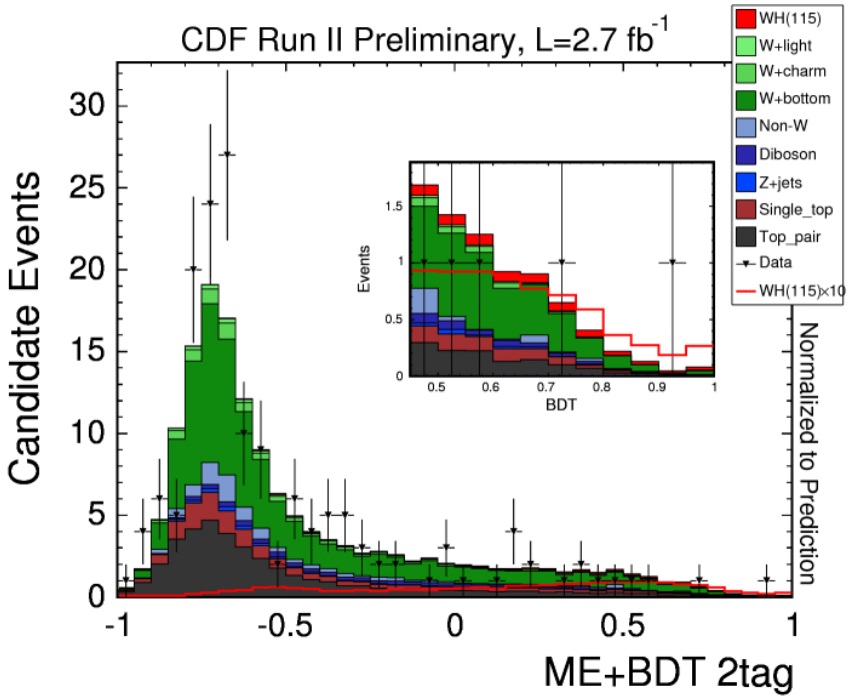
- podział na 1-btag lub 2-btag
- CDF: BDT+ME
- CDF: NN
  $(M_{jj}, p_T^{imb}, p_T^{sys}, M_{\ell\nu j}^{min}, \Delta R_{\ell\nu}, E_T^{jets})$
- DØ : NN
  $(p_T^{j1}, p_T^{j2}, \Delta R_{jj}, \Delta\phi_{jj}, p_T^{jj}, M_{jj}, p_T^{\ell-MET})$
- efektywność $\sim 10\,\%$

SM : $WH \to \ell\nu b\bar{b}$

Rozkład M_{bb} dla 2-btag (DØ):



Rozkład dyskryminanty dla metody BDT+ME dla 2-btag (CDF):

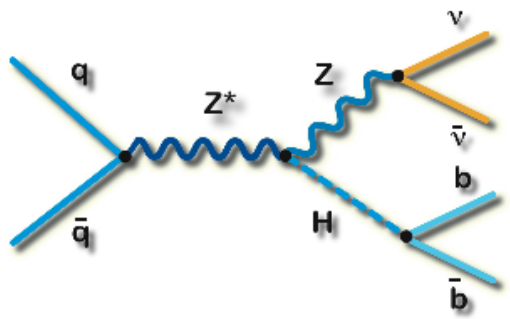


Liczba przypadków (CDF, 2.7 fb^{-1})

	N_{data}	N_{bkgd}	N_{sig}
1-btag	1998	2013±324	6.3±0.5
2-btag	156	148±26	2.0±0.2

SM : $ZH \to \nu\nu b\bar{b}$

$\sigma(ZH \to \nu\nu b\bar{b}) \approx 15\,\text{fb}$
sygnatura: brak $\ell^{\pm}$ + $\not\!\!E_T$ + dżety

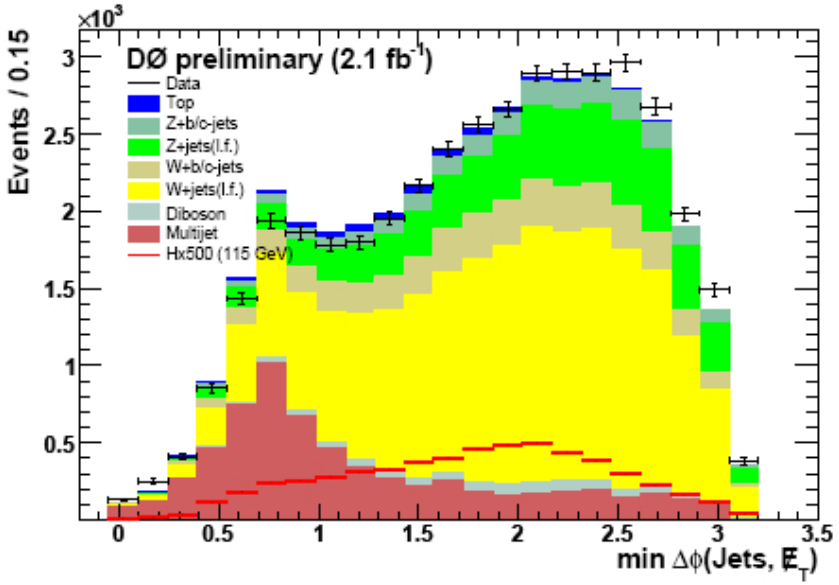


Tło

$W/Z + bb$, $t\bar{t}$, *multijet*

Pre-selekcja (DØ)

- $\not\!\!E_T > 50\,\text{GeV}$
- 2-3 dżety o $E_T > 20\,\text{GeV}$
- cięcia topologiczne, np. $min\,\Delta\phi(j, \not\!\!E_T)$
- 2 dżety z kwarkami b

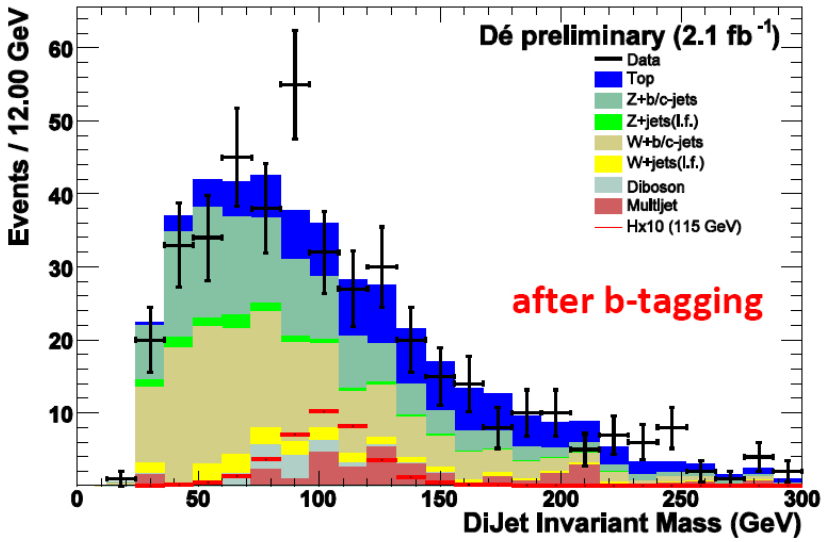


Końcowa selekcja

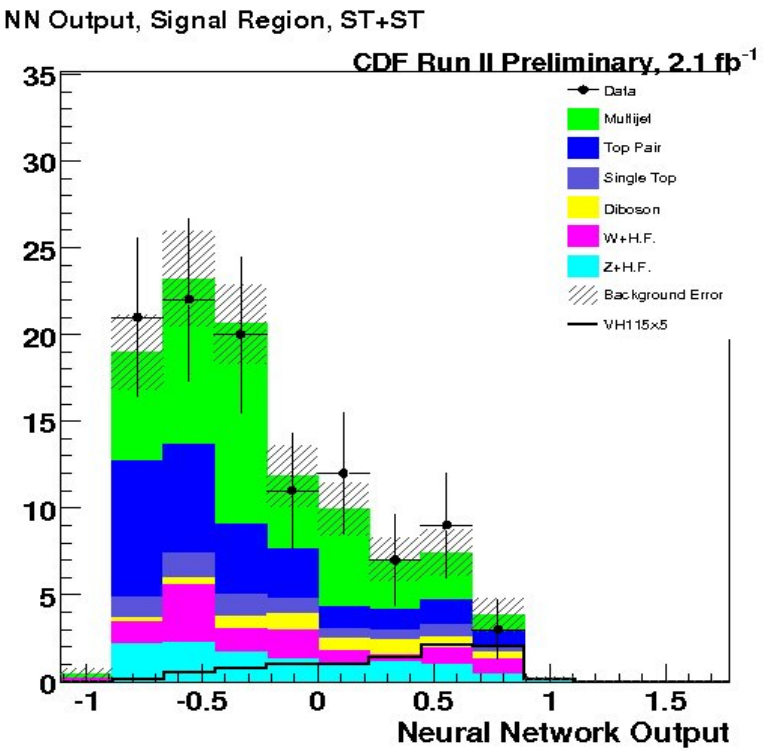
- CDF: NN
- DØ : BDT (24 zmienne)
- efektywność: $\sim 7\,\%$

SM : $ZH \to \nu\nu b\bar{b}$

Rozkład M_{bb} dla 2-btag (DØ):



Rozkład dyskryminanty NN dla 2-btag (CDF):



Liczba przypadków dla $m_H = 115\,\text{GeV}$ (2.1 fb^{-1})

	N_{data}	N_{bkgd}	N_{sig}
CDF (NN)	1696	1780	3.9
DØ (BDT)	439	443	2.1

zbliżona czułość do kanału $WH \to \ell\nu b\bar{b}$

SM : Podsumowanie dla lekkiego H

m_H=115 GeV/c^2

Channel	CDF 95% C.L. Limits $\sigma \cdot BR/SM$ obs (exp)	D0 95% C.L. Limits $\sigma \cdot BR$ /SM obs (exp)
$WH \to l\nu bb$ (NN)	5.0 (5.8) 2.7fb^{-1}	9.3 (8.5) 1.7fb^{-1}
$WH \to l\nu bb$ (ME+BDT)	5.7 (5.6) 2.7fb^{-1}	
$WH \to \tau\nu bb$ (NN)	-	35.4 (42.1) 0.9fb^{-1}
$VH \to qqbb$ (ME)	37.0 (36.6) 2.0fb^{-1}	-
$ZH \to llbb$ (NN)	11.6 (11.8) 2.4fb^{-1}	11.0 (12.3) 2.3fb^{-1}
$ZH \to llbb$ (ME) (m_H=120 GeV)	14.2 (15.0) 2.0fb^{-1}	
$ZH \to \nu\nu / WH \to$ (l) νbb (NN)	7.9 (6.3) 2.1fb^{-1}	7.5 (8.4) 2.1fb^{-1}
$ttH \to l\nu bbbbqq$	-	63.9 (45.3) 2.1fb^{-1}
$H \to \gamma\gamma$	-	30.8 (23.2) 2.7fb^{-1}
$H \to \tau\tau$	30.5 (24.8) 2.2fb^{-1}	-
Combined	4.2 (3.6)	5.3 (4.6)

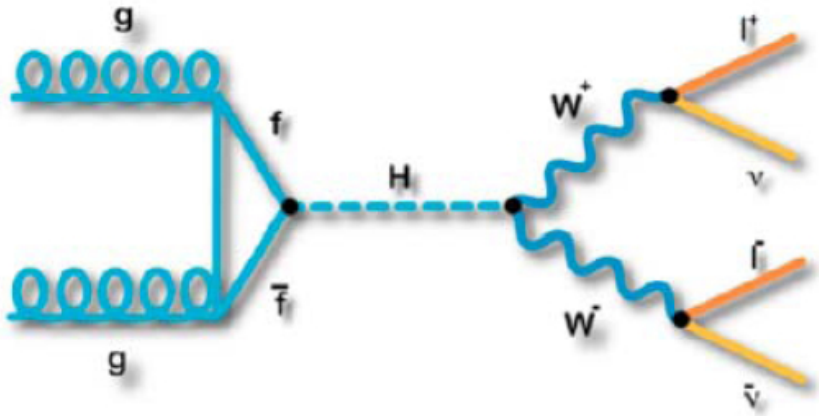
A.Mehta, P@LHC'08

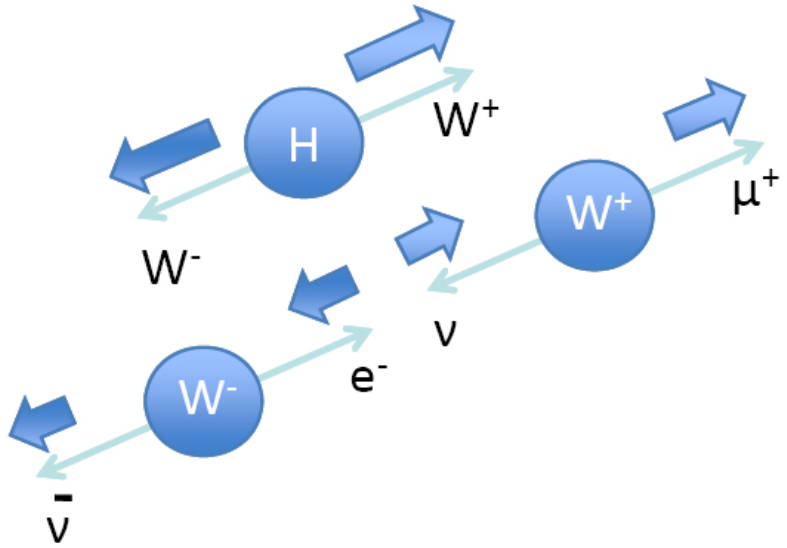
SM : $H \to WW^\star \to \ell\ell\nu\nu$

$\sigma(H \to WW^\star \to \ell\ell\nu\nu) \approx 20\,\text{fb}$
dla $m_H = 170\,\text{GeV}$
sygnatura: 2 leptony + $\not{E}_T$

Tło

WW, $t\bar{t}$, $Z \to \ell\ell$, $W + jets$
korelacja spinowa: średnie $\Delta\phi_{\ell\ell}$ jest mniejsze niż dla WW

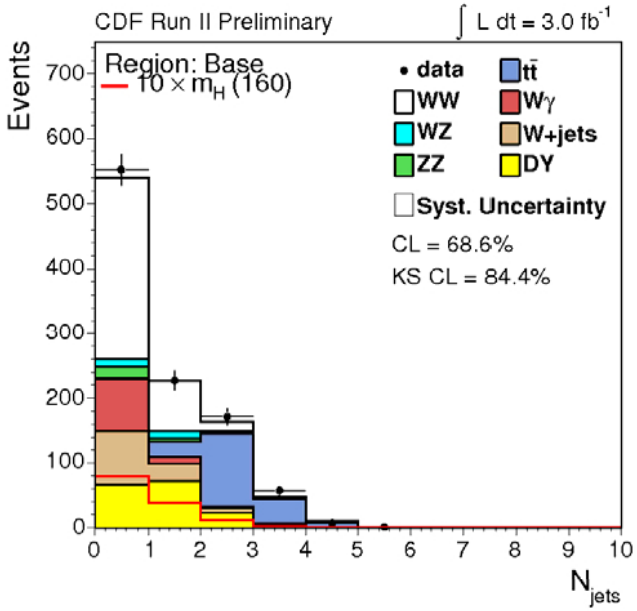




SM : $H \to WW^\star \to \ell\ell\nu\nu$ (CDF)

Separate into 0, 1, and 2-jet bins

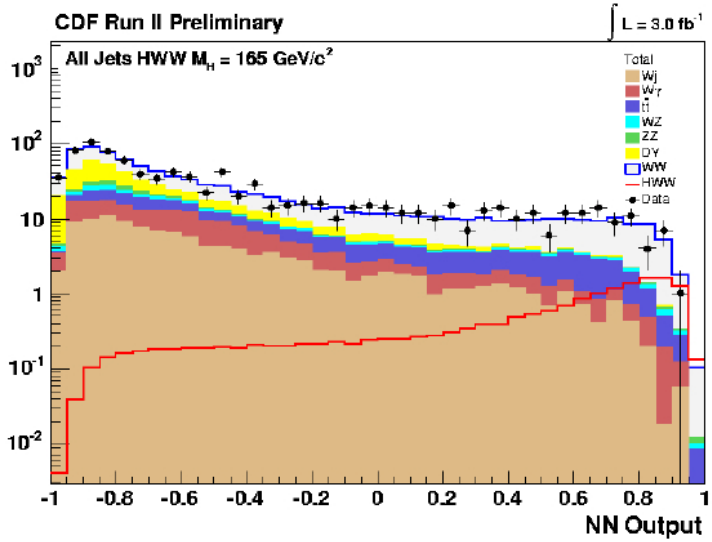
- backgrounds and signal kinematics are different for each jet bin
- sensitive to additional signal contributions from WH, ZH, and VBF final states in the 2-jet bin



- separate NN for each jet bin
- add ME for the 0-jet bin

Event yield before NN (M_H=160 GeV)

Jet bin	Nsig	Nbkgd	Ndata
0	8.4±1.3	540±65	552
1	5.2±0.7	226±28	227
2	3.9±0.5	129±20	139

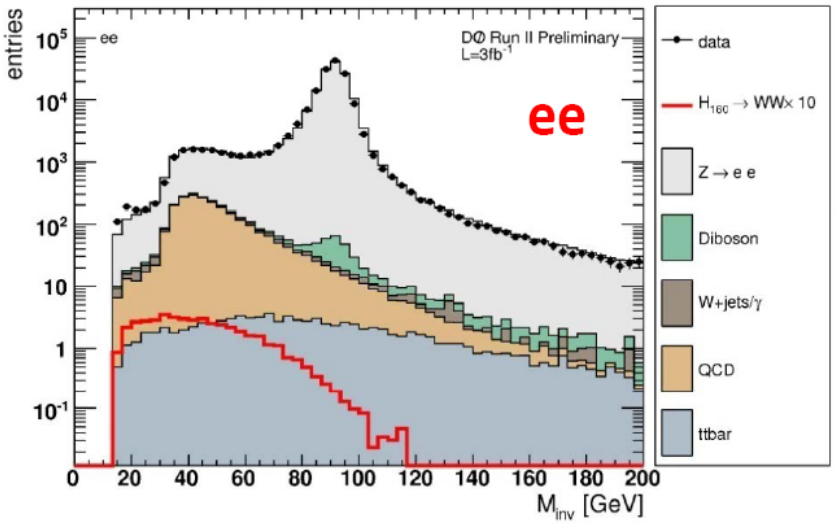


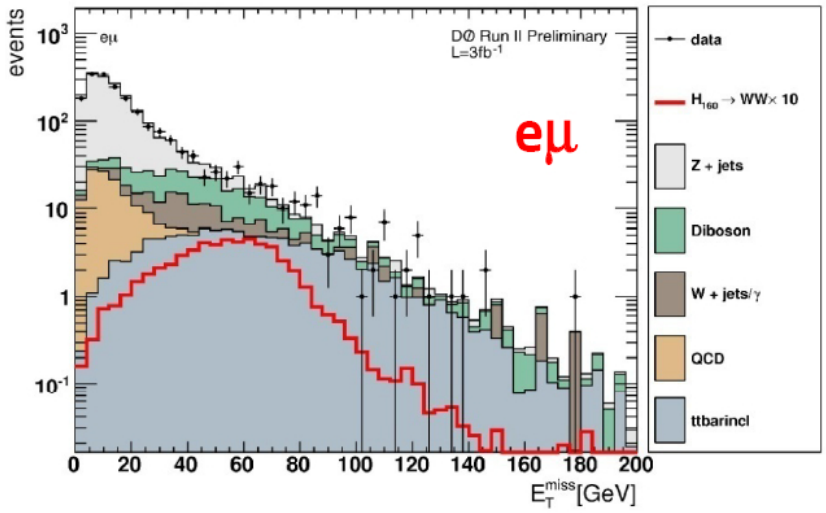
J.Qian, P@LHC'08

SM : $H \to WW^* \to \ell\ell\nu\nu$ (DØ)

Event pre-selection:

- two leptons with pT(e)>15 GeV, pT(μ)>10 GeV and M(ll) > 15 GeV





Additional selection:

missing Et>20 GeV,
kinematic requirements (M_T, $\Delta\phi$, ...)

selection efficiency ~ 25%

Three separate NNs trained for every 5 GeV in the signal mass to determine the final sensitivities

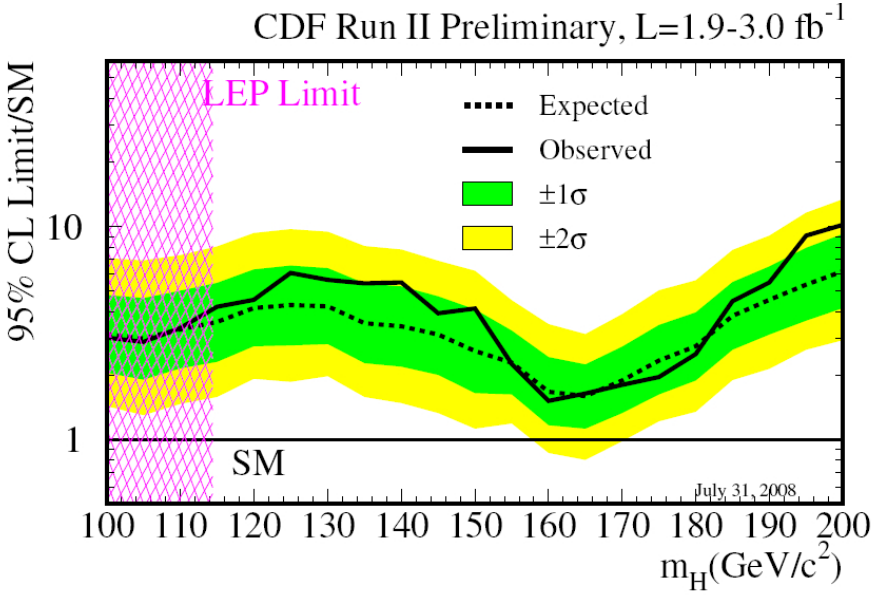
Event yield before NN (M_H=160 GeV)

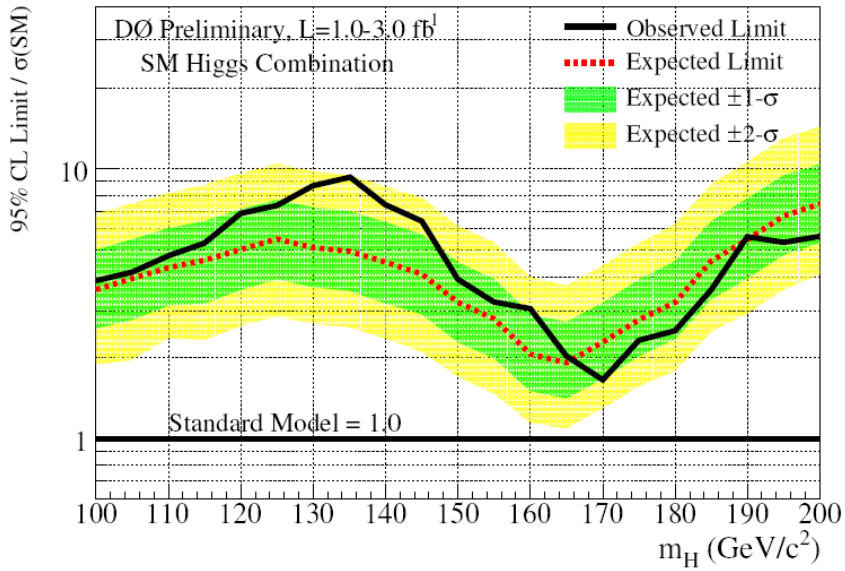
	Nsig	Nbkgd	Ndata
ee	3.5	238±11	236
μμ	4.1	1242±16*	1147
eμ	6.9	234±9	234

(* the large background is mostly due to the low pT(μ) cut)

J.Qian, P@LHC'08

SM : Kombinacja w ramach każdego eksperymentu





CDF - metoda bayesowska

m_H [GeV]	95 % C.L. Limit/σ_{SM}	
	Observed	Expected
115	4.2	3.6
165	1.6	1.6

DØ - metoda CL_s

m_H [GeV]	95 % C.L. Limit/σ_{SM}	
	Observed	Expected
115	5.3	4.6
165	2.0	1.9

SM : Kombinacja pomiędzy CDF i DØ

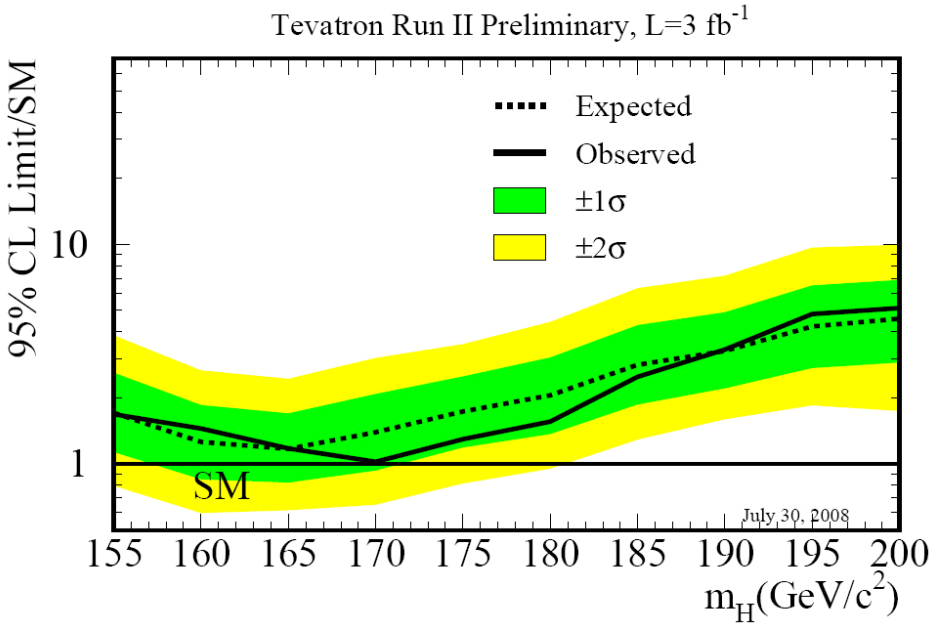
Lekki Higgs

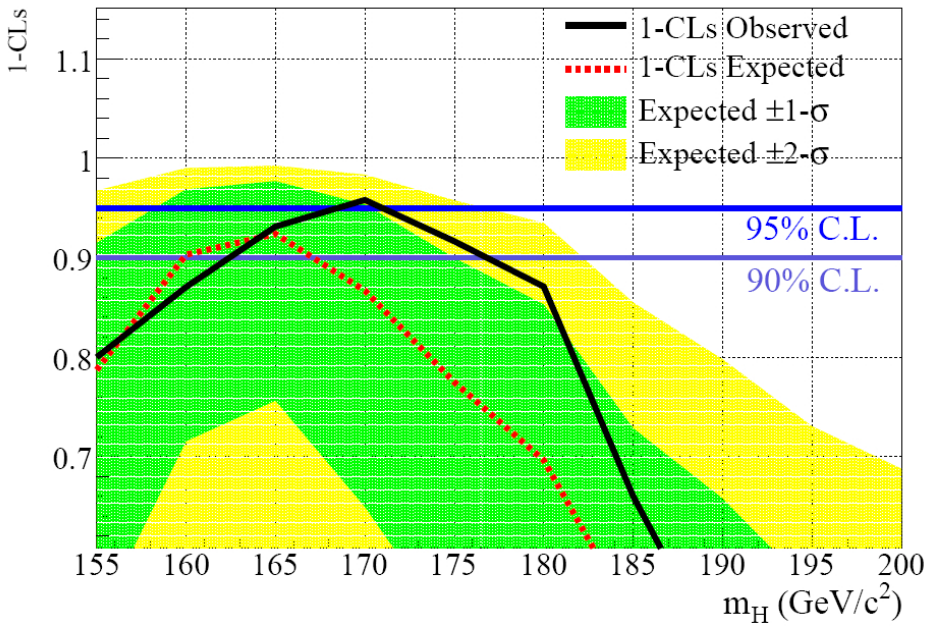
- kombinacja dla $3\,\mathrm{fb}^{-1}$ w przygotowaniu ($\sim$ 70 kanałów!)
- oczekuje się limitu $\sim 3\times$SM dla $m_H = 115\,\mathrm{GeV}$

Ciężki Higgs

- kanały: $H \to W^+W^-$, $WH \to WW^+W^-$
- zakres mas: $155 < m_H < 200\,\mathrm{GeV}$, statystyka: 1-3 fb^{-1}
- produkcja H o masie $\approx 170\,\mathrm{GeV}$ wykluczona @ 95 % C.L.
- 2 metody: bayesowska i konserwatywna:
  - zgodne wyniki w granicach 10 %
  - wykorzysują kształty rozkładów dyskryminant końcowych ($\equiv$ wyjście z NN)
  - efekty systematyczne: wpływają na spodziewaną liczbę przypadków (S, B), zmieniają kształt rozkładów dyskryminant końcowych, są skorelowane w ramach/pomiędzy CDF i DØ
  - wykorzystują metodę największej wiarygodności opartą na statystyce Poissona

SM : Kombinacja pomiędzy CDF i DØ





95% CL limit/SM

M_H (GeV)	160	165	170	175	180
Expected	1.3	1.2	1.4	1.7	2.0
Observed	1.4	1.2	1.0	1.3	1.6

Higgs poza Modelem Standardowym

Minimal Supersymmetric Standard Model

- 2 dublety Higgsa, 5 fizycznych stanów: H^+, H^-, A, H, h
- 2 wolne parametry: $\tan\beta \equiv v_u/v_d$, m_A
- dla $\tan\beta \gg 1$: (za dużym $\tan\beta$ przemawia stosunek $m_t/m_b \approx 40$)
  - 2 stany spośród A, H, h są zdegenerowane masowo $\Rightarrow$ ϕ
    $\phi = (h, A)$ dla $m_\phi < 130\,\text{GeV}$
    $\phi = (H, A)$ dla $m_\phi > 130\,\text{GeV}$
  - sprzężenie ϕ do *dolnych fermionów* (b, τ) zwiększone o czynnik $\tan\beta$ w stosunku do SM
  - dominują rozpady: $BR(\phi \to b\bar{b}) \sim 90\,\%$, $BR(\phi \to \tau^+\tau^-) \sim 10\,\%$

Poszukiwania ϕ

$$p\bar{p} \to \phi + X \quad : \quad \phi \to \tau^+\tau^-$$
$$p\bar{p} \to b\bar{b}\phi + X \quad : \quad \phi \to b\bar{b},\ \phi \to \tau^+\tau^-$$

Poszukiwania $H^\pm$

$$p\bar{p} \to t\bar{t} + X \quad : \quad t \to bH^+$$

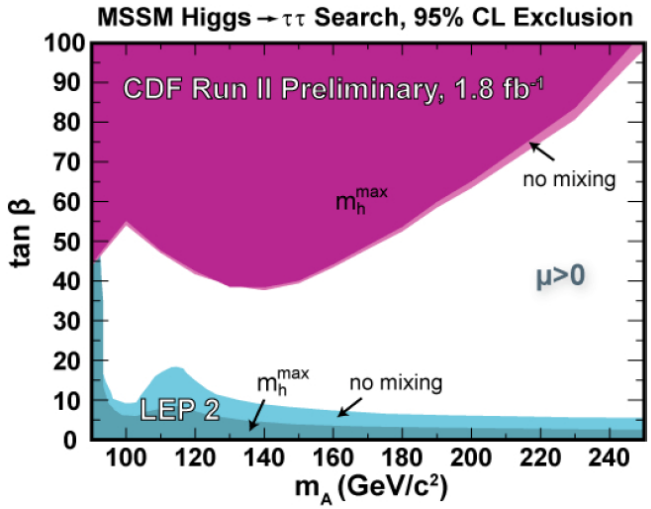
MSSM : $\phi \longrightarrow \tau\tau$

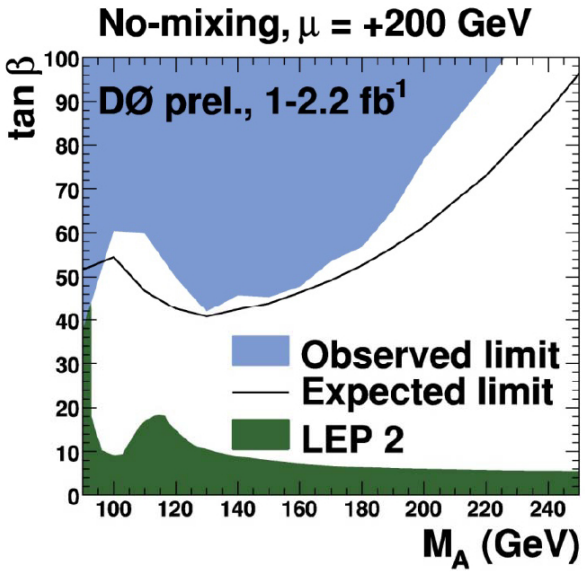
Selekcja i analiza

- $\phi \longrightarrow \tau\tau$ (CDF, DØ), $b\phi \longrightarrow b\tau\tau$ (DØ)
- tryger: $e + \tau$ oraz $\mu + \tau$
- identyfikacja τ: efektywność $\sim 60\,\%$ przy $1\,\%$ prawd. pomyłki

Wyniki

- nowe wykluczenia w przestrzeni $\tan\beta$ vs m_A @ $95\,\%$ C.L.
- czułość sięga $\tan\beta \sim 40$
- kombinacja CDF i DØ w przygotowaniu...





Podsumowanie

- Przedstawione wyniki dotyczą zintegrowanej świetlności : $1.0 - 3.0\,\mathrm{fb}^{-1}$.
- SM : Kombinacja wyników CDF i DØ pozwala wykluczyć masę standardowego bozonu Higgsa w okolicy $m_H = 170\,\mathrm{GeV}$ na poziomie ufności 95%.
- MSSM : Analizy dla neutralnych, supersymetrycznych bozonów Higgsa są czułe w szerokim zakresie mas m_A do $\tan\beta \gtrsim 40$.

Dalsze perspektywy - I

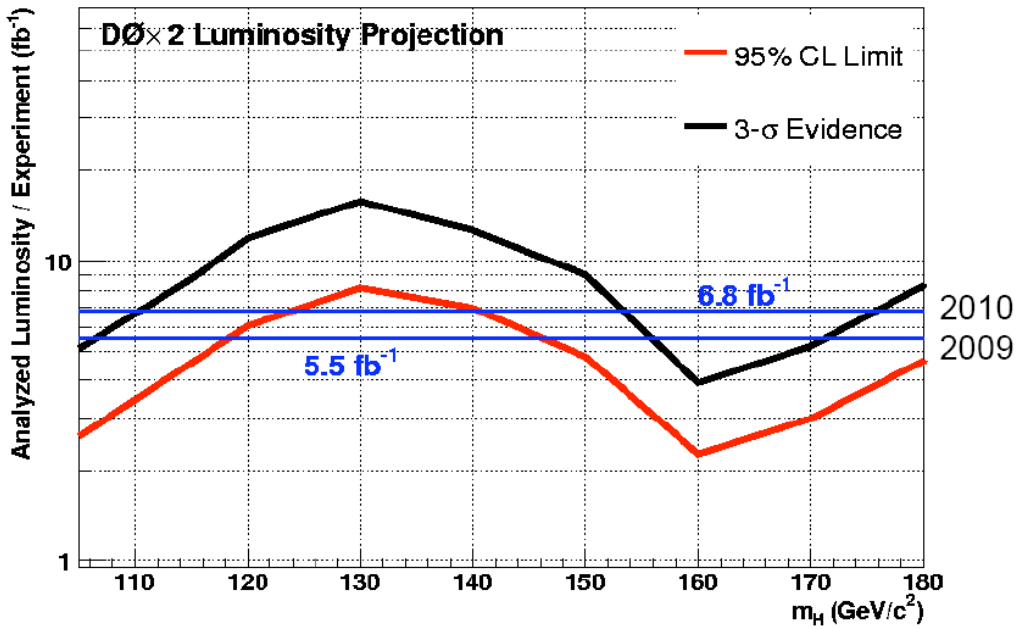
- Akcelerator działa stabilnie ($> 40\,\mathrm{pb}^{-1}$/tydzień).
- Wysoka sprawność zbierania danych ($> 85\,\%$).
- Każdy z eksperymentów ma $> 4\,\mathrm{fb}^{-1}$ danych do przeanalizowania.
- Kolejne kombinacje limitów z CDF i DØ są w toku.
- Do końca 2009 spodziewane jest zebranie $\sim 6\,\mathrm{fb}^{-1}$/eksperyment.
- Rozważane jest działanie Tevatronu w 2010 (decyzja wiosną 2009).

Dalsze perspektywy - II

Czułość eksperymentów rośnie szybciej niż $\sqrt{L}$.

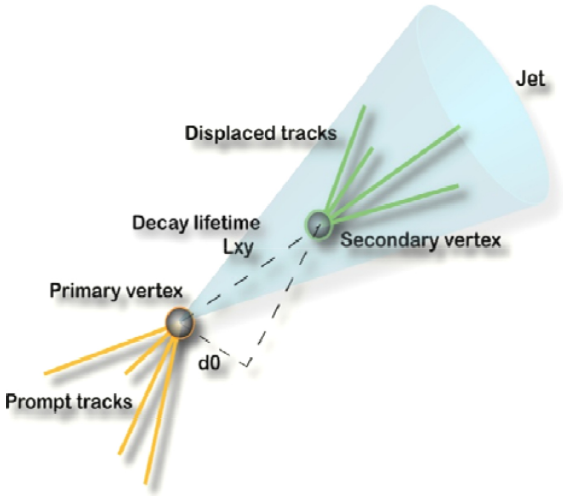
Spodziewane udoskonalenia:

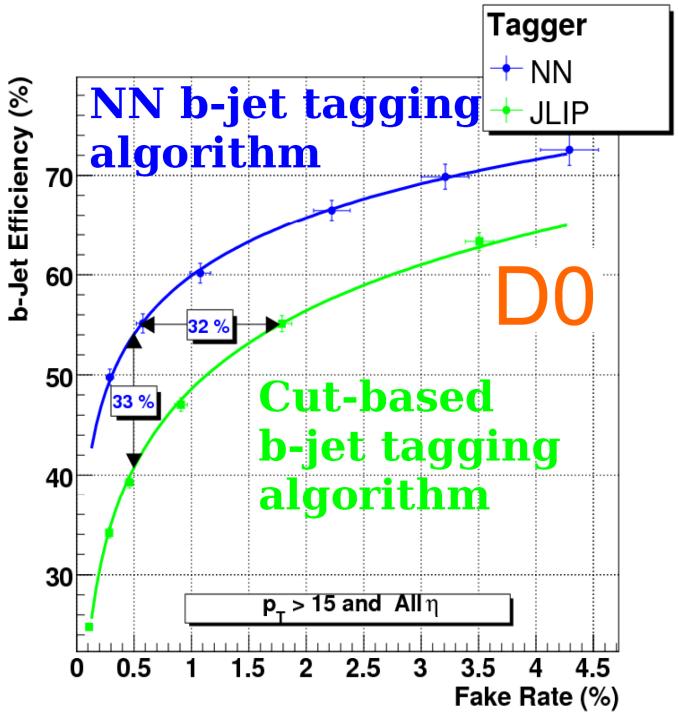
- włączenie do analizy dotąd nieużywanych kanałów
- akceptacja i efektywność na leptony *(tryger, EM-id, TAU-id)*
- znakowanie zapachów *(B-id)*
- metody wieloparametrowe
- rozdzielczość dwudżetowa
- ocena efektów systematycznych
- modelowanie tła

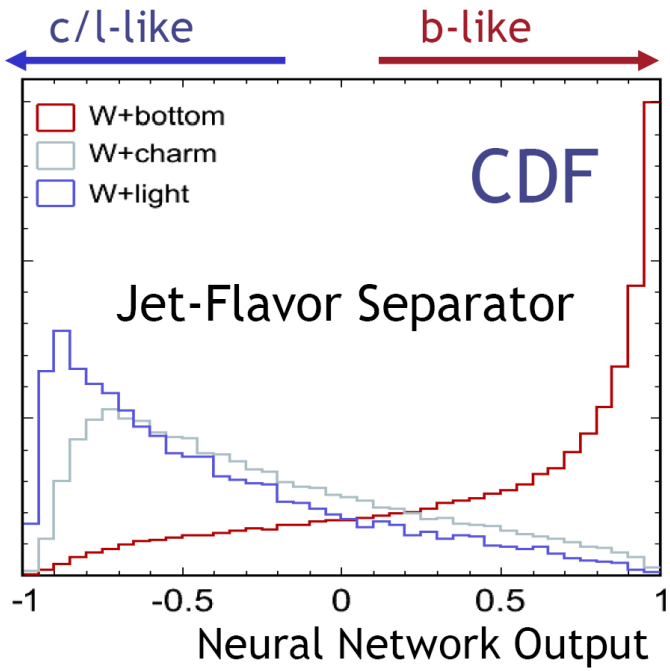


Identyfikacja kwarku *b*

- Najbardziej czułe kanały dla $H \rightarrow b\bar{b}$
- Detektory krzemowe służą do znajdowania wierzchołków wtórnych
- Efektywność: 40-70 %
- Prawdopodobieństwo błędnej identyfikacji: 0.5-5 %
- DØ używa NN wykorzystujących długi czas życia *B*
- CDF używa algorytmów szukania wtórnego wierzchołka + NN do separacji zapachów







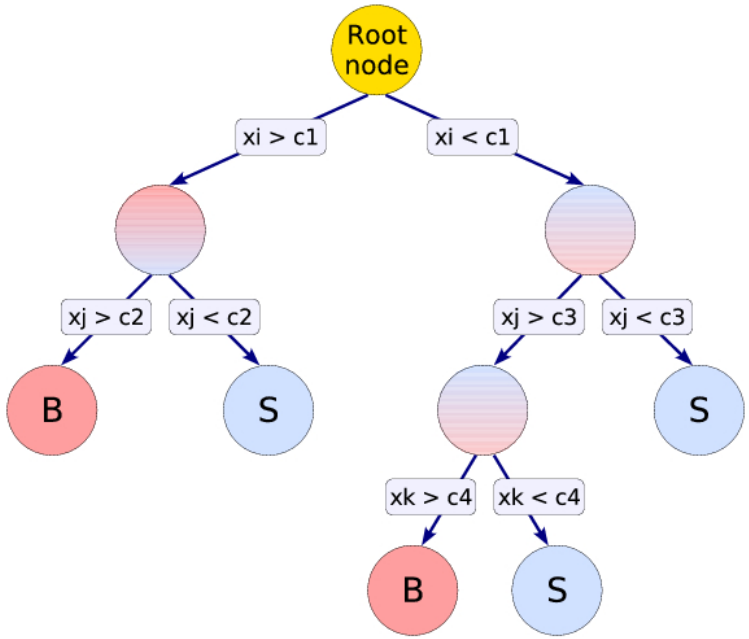
Boosted Decision Tree

Drzewo decyzyjne (DT)

- na każdym etapie używana jest inna dyskrymiananta oraz inny próg pozwalający na jak najlepsze oddzielenie S i B
- przestrzeń fazowa podzielona jest na obszary S i B po “wytrenowaniu” drzewa
- odpowiedź pojedynczego drzewa jest podatna na fluktuacje statystyczne w próbce “treningowej”

Boosted Decision Tree (BDT)

- kilka drzew decyzyjnych naraz
- do “treningu” używa się tej samej próbki, ale z różnymi wagami przypadków
- ostateczna kwalifikacja na podstawie ważonej większości głosów z kilku drzew



Więcej informacji...

Publiczne wyniki z CDF i DØ

- CDF: `http://www-cdf.fnal.gov/physics/new/hdg/hdg.html`
- DØ : `http://www-d0.fnal.gov/Run2Physics/WWW/results/higgs.htm`

Prezentacje

- *34th International Conference on High Energy Physics*
  Filadelfia, PA, USA (29/07 - 5/08/2008), 5 prezentacji
  `http://ichep08.com`
- *Higgs Results From the Tevatron*
  CERN Joint EP/PP Seminar (8/09/2008), 2 prezentacje
  `http://indico.cern.ch/categoryDisplay.py?categId=79`
- *Physics at LHC*
  Split, Chorwacja (29/09 - 4/10/2008), 3 prezentacje
  `http://www.fesb.hr/physicslhc`