

# 高エネルギー陽子反陽子衝突による 素粒子物理研究

金 信弘

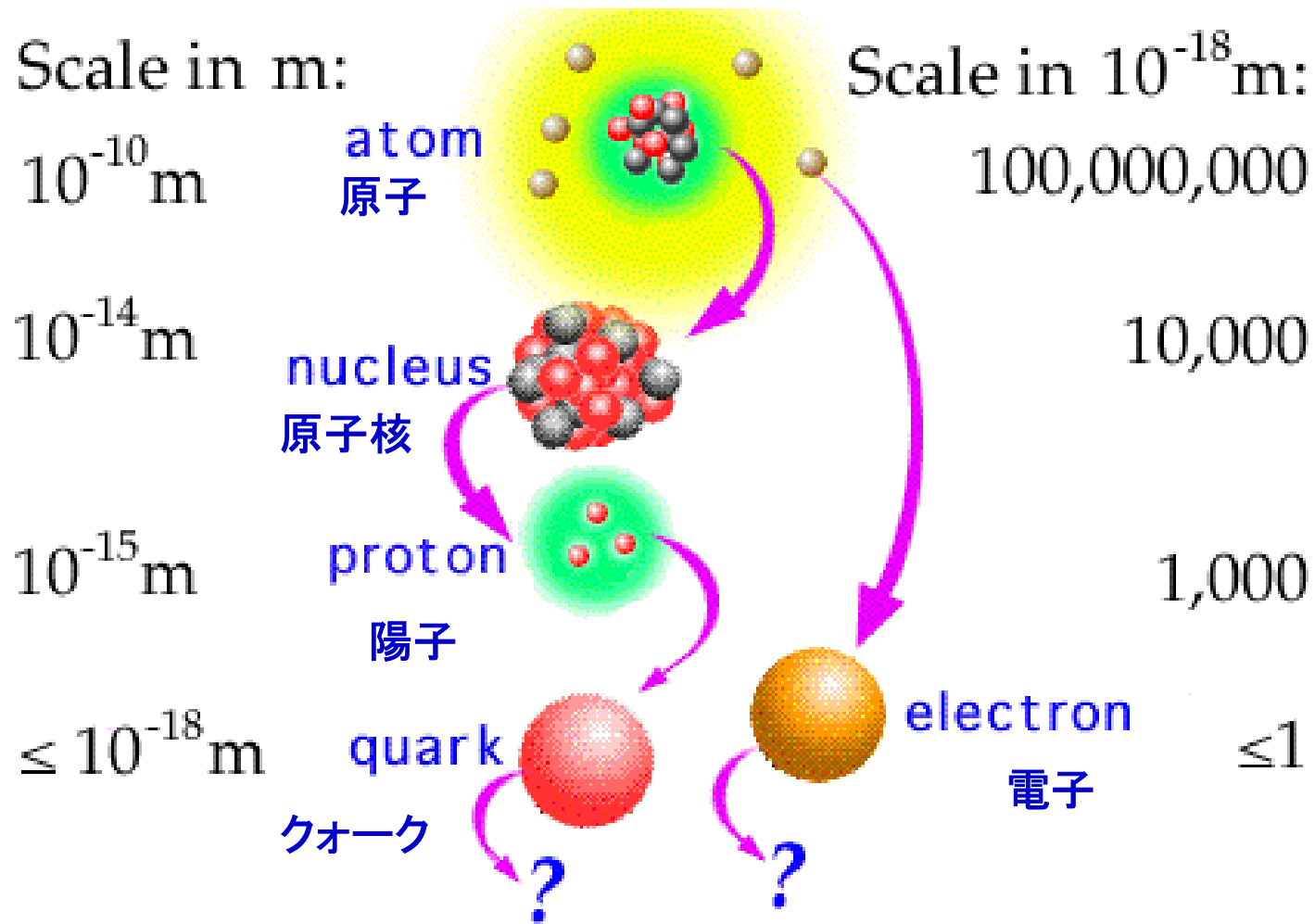
筑波大学数理物質科学研究科物理学専攻

プレカレッジ講義(多賀高等学校)

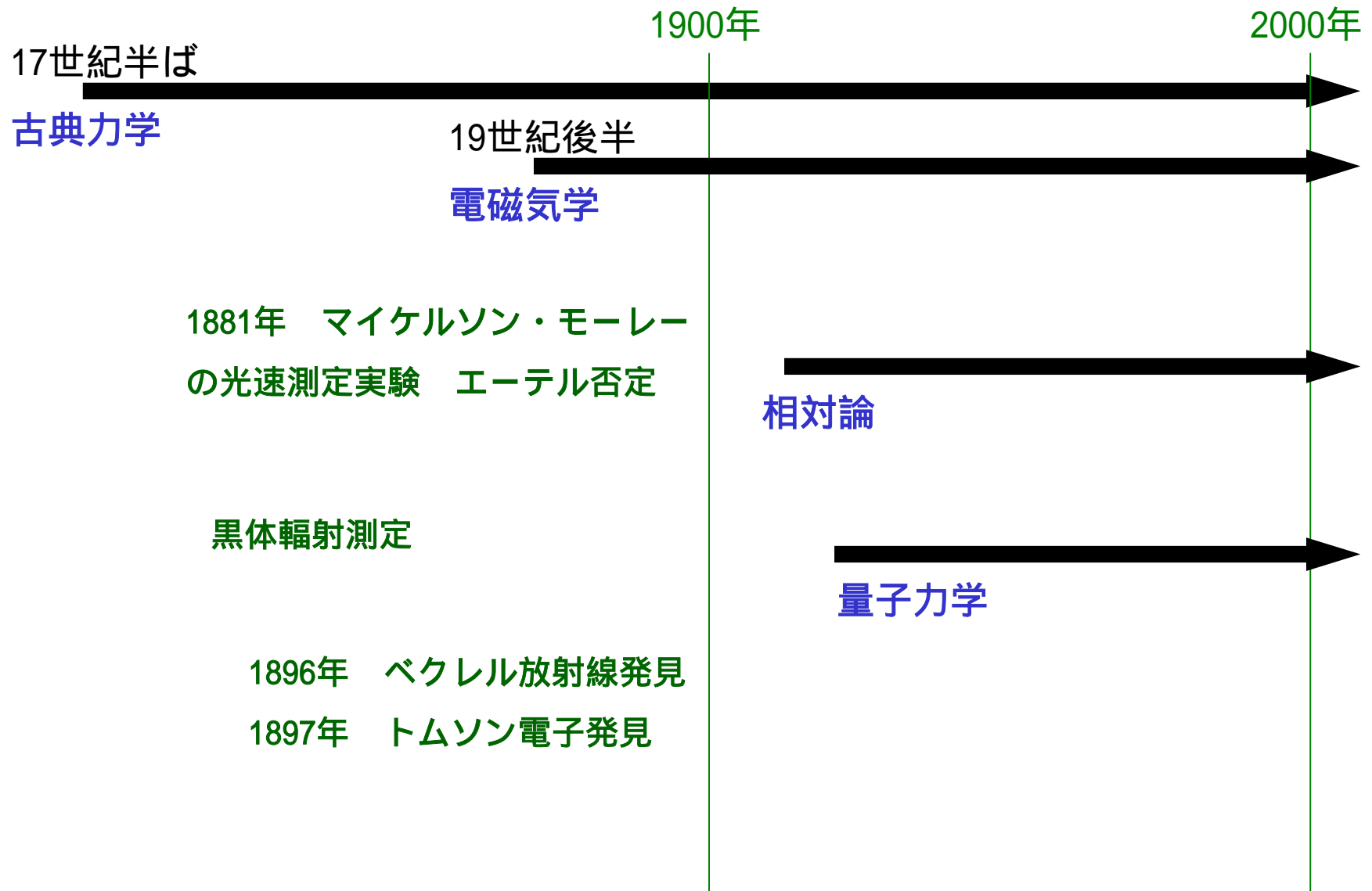
2004年7月28日

- はじめに — 素粒子物理学概論
- 高エネルギー陽子反陽子衝突実験(CDF実験)  
トックオークの発見  
 $B_c$ 中間子の発見
- 素粒子物理学の将来

# 素粒子とは？



# 物理学発展の歴史



# 素粒子物理学の歴史

~ BC4c. 「物質はすべて均質で不可分のA-TOM〔原子〕からできている。」  
古代ギリシャ自然哲学者デモクリトス

19 ~ 20c初め 物質の構成要素である原子の発見。

1900

1897年：電子の発見(J.J.Thomson)

1905年：特殊相対論(A.Einstein)  
前期量子論(M.Planck, N.Bohr)

1911年：原子の構造 = 原子核 + 電子(E.Rutherford)

1913年：一般相対論(A.Einstein)

1913年：陽子の発見(E.Rutherford)

量子力学(W.Heisenberg, E.Schrodinger, P.Dirac)

1932年：中性子の発見(J.Chadwick)

1933年：陽電子の発見(C.Anderson)

1935年：中間子論(湯川秀樹)

1937年： $\mu$  粒子の発見(C.Anderson)

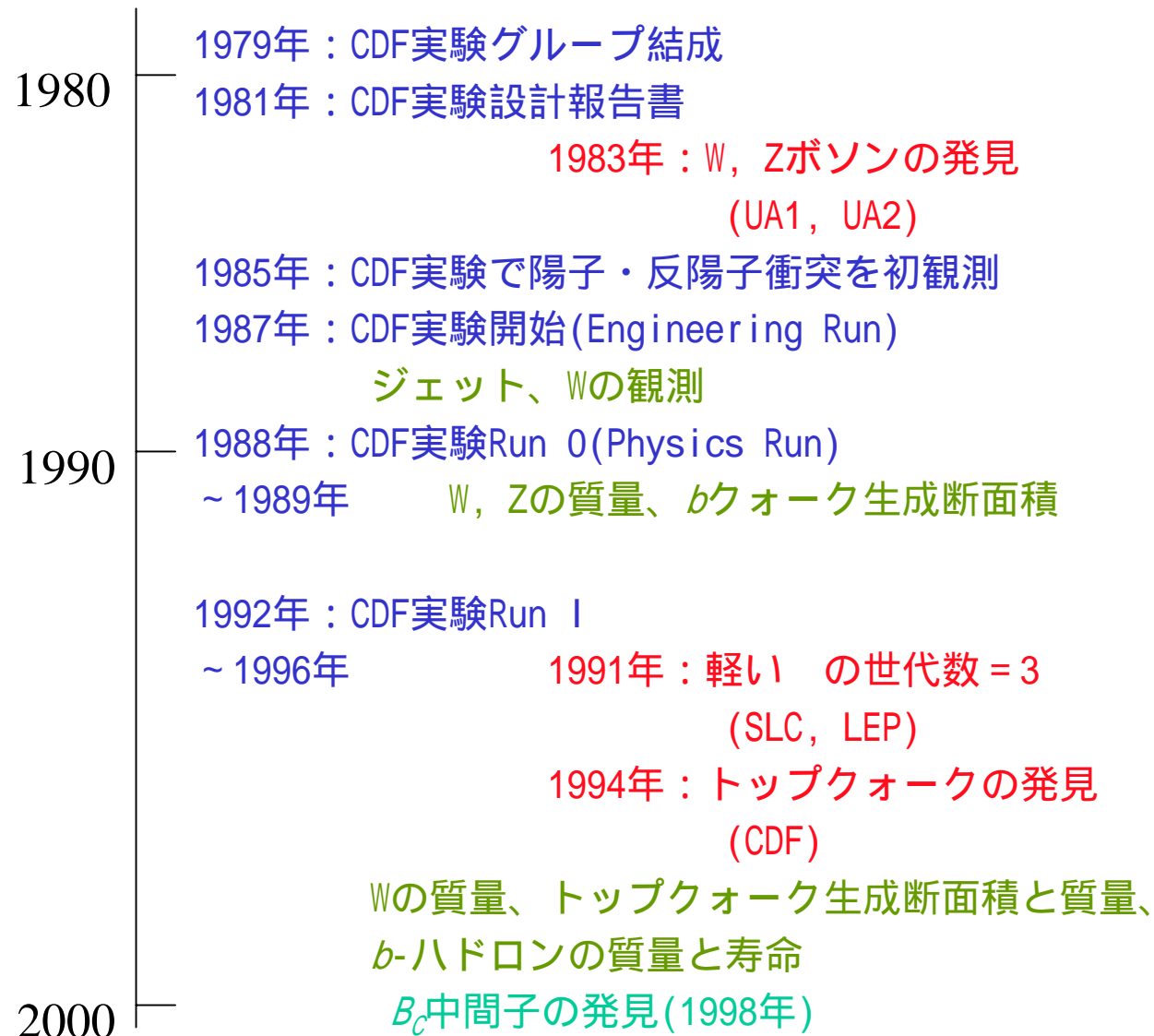
1950

1948年：量子電磁力学QED(くりこみ理論)(朝永, R.Feynman, J.Schwinger)

# 素粒子物理学の歴史

- 1950
- 20c半ば：1947年の 中間子の発見を皮切りに多くのハドロン（中間子、バリオン）  
発見
- 1956年： $\pi^+$ の発見(F.Reines)  
1956年：反陽子の発見(O.Chamberlain, E.Segre)  
1956年：パリティ保存則の破れ(T.D.Lee, C.N.Yan)
- 1960
- 1962年： $\mu^+$ の発見(L.Lederman, M.Schwartz, J.Steinberger)  
1964年：クォーク模型(M.Gell-Mann, G.Zweig)SU(3)3重項の u, d, sクォーク  
1964年：CP保存則の破れの発見(J.Cronin, V.Fitch)  
1967年：電弱統一理論  
(S.Weinberg, S.Glashow, A.Salam)+QCD = 素粒子標準模型(1973年)  
1969年：パートン模型(R.Feynman)  
1969年：電子陽子深非弾性散乱 = パートン模型で説明 (J.Friedman, H.Kendall,  
R.Taylor)
- 1970
- 1971年：Yang-Mills 場の理論はくりこみ可能 (G.'t Hooft)  
1974年： $J/\psi(c\bar{c})$  の発見 =  $c$ クォークの発見 (S.Ting, B.Richter)  
1976年： $\tau$  の発見(M.Perl)  
1976年： $\bar{\nu}_\mu e \rightarrow \bar{\nu}_\mu e$  の発見(Gargamelle Group)  
1977年： $(b\bar{b})$  の発見 =  $b$ クォークの発見(L.Lederman)  
1980年：グルオンジェットの発見(at PETRA)
- 1980

# CDFの歴史    素粒子物理学の歴史



# 素粒子と素粒子間の力(素粒子物理標準理論)

## 物質を構成する粒子(フェルミオン)

### クォーク

アップ(0.002)	チャーム(1.3)	トップ(175)	電荷 2/3
ダウン(0.005)	ストレンジ(0.14)	ボトム(4.2)	- 1/3

### レプトン

電子(0.0005)	ミュー粒子(0.106)	タウレプトン(1.8)	- 1
電子ニュートリノ $\nu_e$	ミューニュートリノ $\nu_\mu$	タウニュートリノ $\nu_\tau$	0

## 力を伝える粒子(ゲージボソン)

### 強い力

グルオン(0)

### 電磁気力

光子(0)

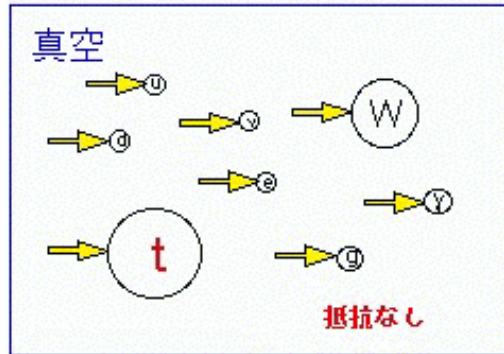
### 弱い力

W粒子(80)

Z粒子(91)

( )内の数字はGeVの  
単位で書かれた質量

# 質量の起源(ヒッグス機構)



標準理論の考え方

ビッグバン直後

真空から抵抗を受けないので粒子の質量は0。

## ヒッグスポテンシャル

$$V(\phi) = \mu^2\phi^2/2 + \lambda\phi^4/4 \quad (\lambda > 0)$$

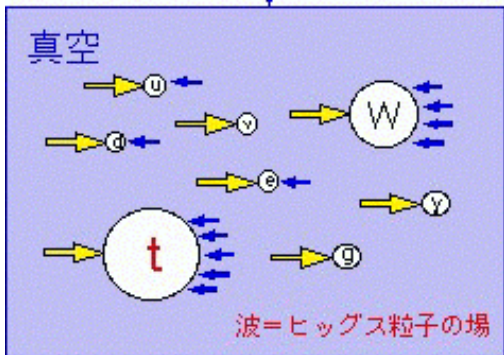
$\mu^2 > 0$  (ビッグバン直後)

真空の相転移(対称性の破れ)

$\mu^2 < 0$  (現在)

真空の相転移

宇宙が膨張するとともに冷え、水蒸気が水になるように真空中にヒッグス粒子の場が凝結する。



現在

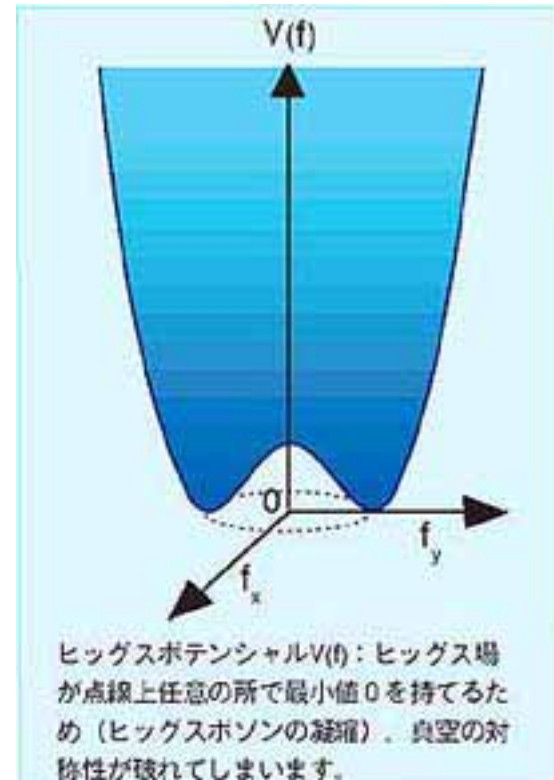
真空にはヒッグスが充滿している!

粒子を加速しようとする時、ヒッグスにぶつかる。

$$m(\text{質量}) = g(\text{衝突確率}) \times v(\text{ヒッグスの密度})$$

ぶつかりやすいほど重い!

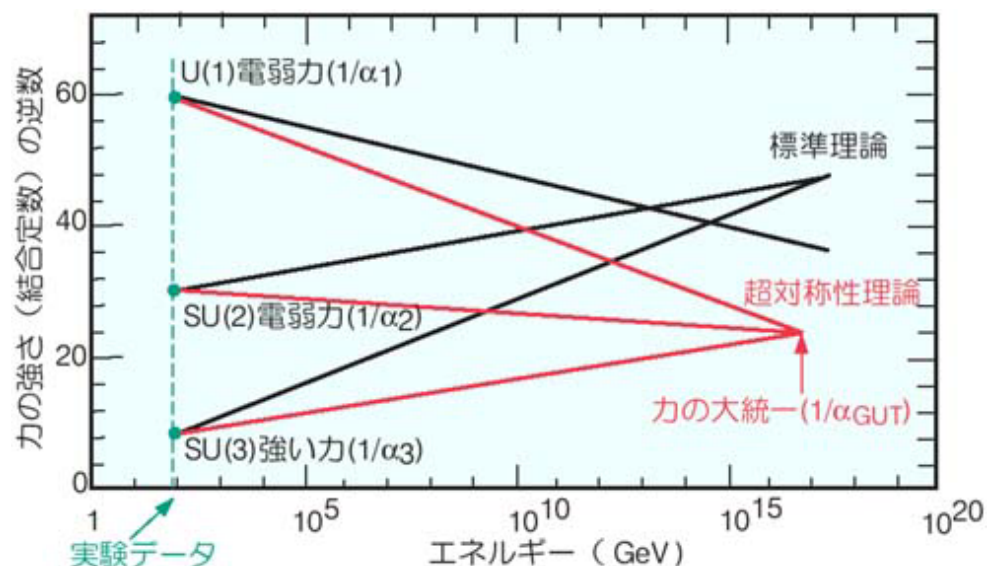
→ 力      → 抵抗





## 大統一理論

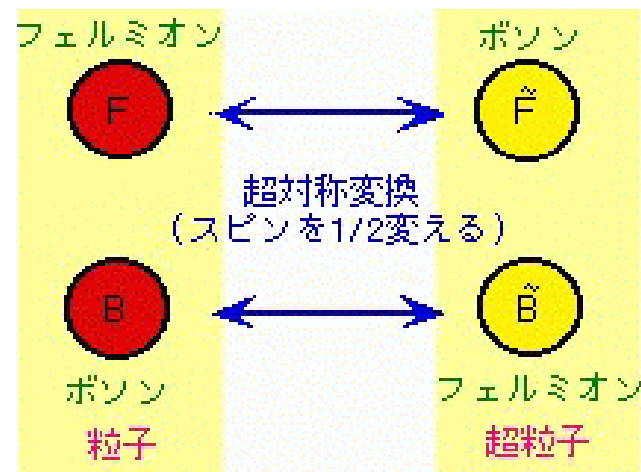
三つの力(電磁力、弱い力、強い力)は、宇宙創生直後の高温時には対称性が成り立ち、同一の力であった。それが冷えてきたときに対称性が破れて異なる力に見えるようになった。



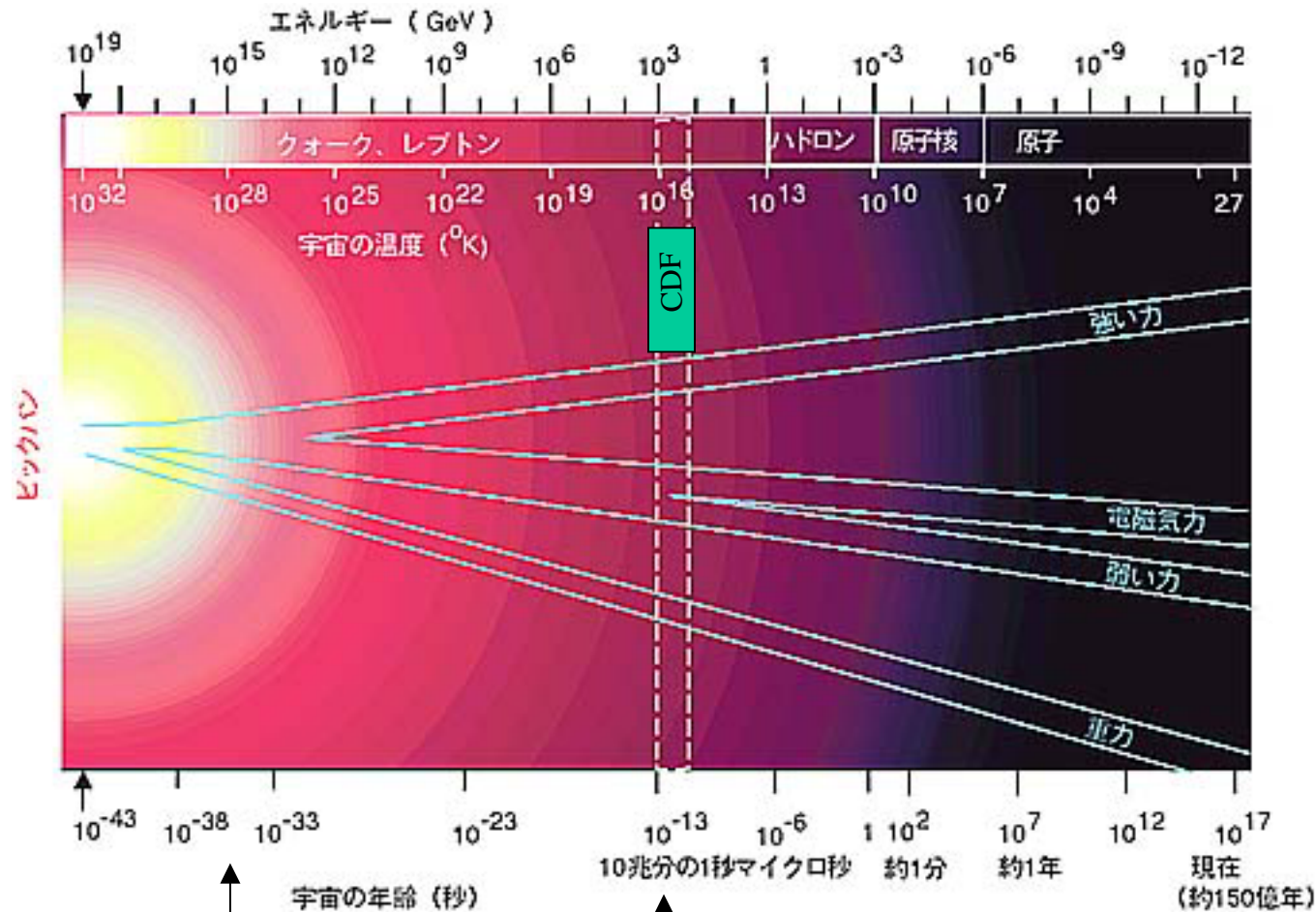
## 超対称性理論

すべてのフェルミオン(ボソン)には超対称粒子のボソン(フェルミオン)のパートナーが存在する。この超対称性を仮定すると、三つの力の統一がある高温状態で成り立つ。

この理論は有望であると考えられている。この理論が正しければ、質量150GeV/c<sup>2</sup>以下のヒッグス粒子が存在するし、また標準理論で期待される以上のK中間子、τ粒子、B中間子の稀崩壊が起こる。



# ビッグバン宇宙と素粒子物理



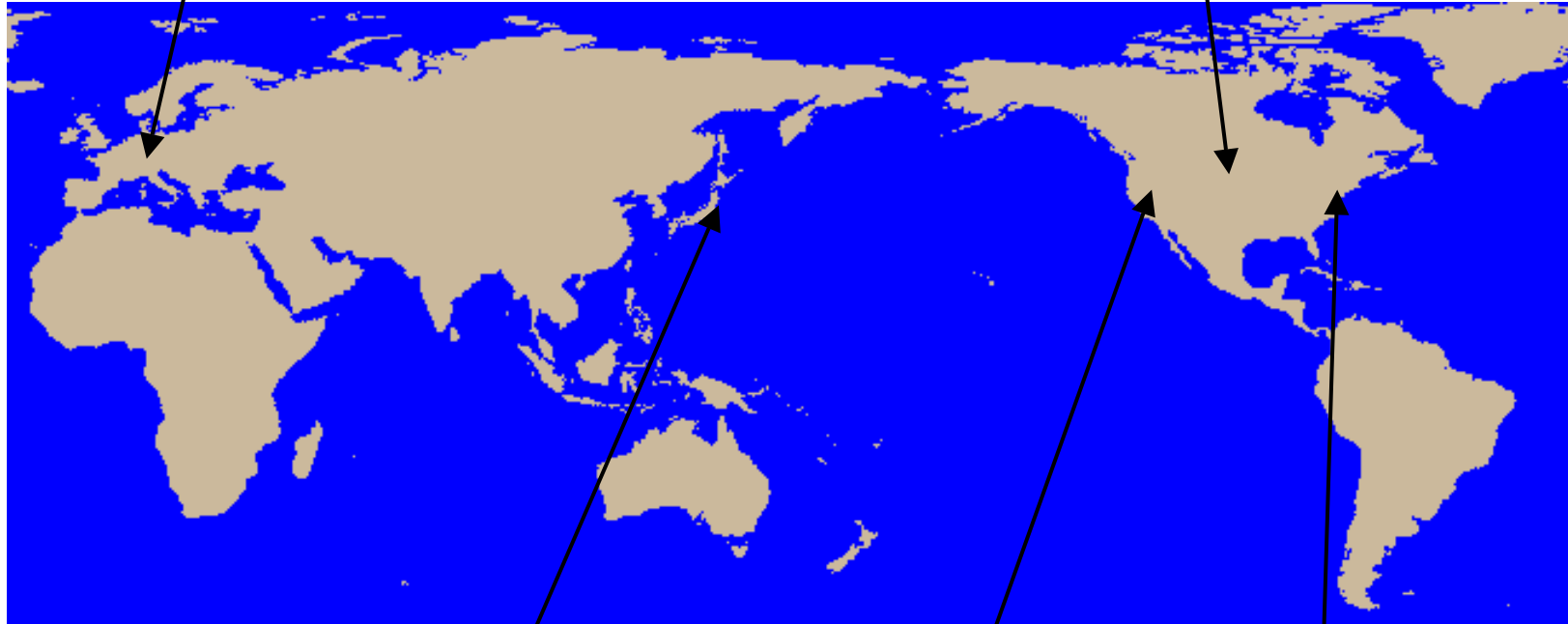
大統一理論  
 真空の相転移  
 粒子反粒子対称性の破れ

電弱統一理論  
 ヒッグス粒子

# 主要な高エネルギー加速器研究所

欧州共同原子核研究所(欧) CERN

フェルミ国立加速器研究所  
(米国) FERMILAB

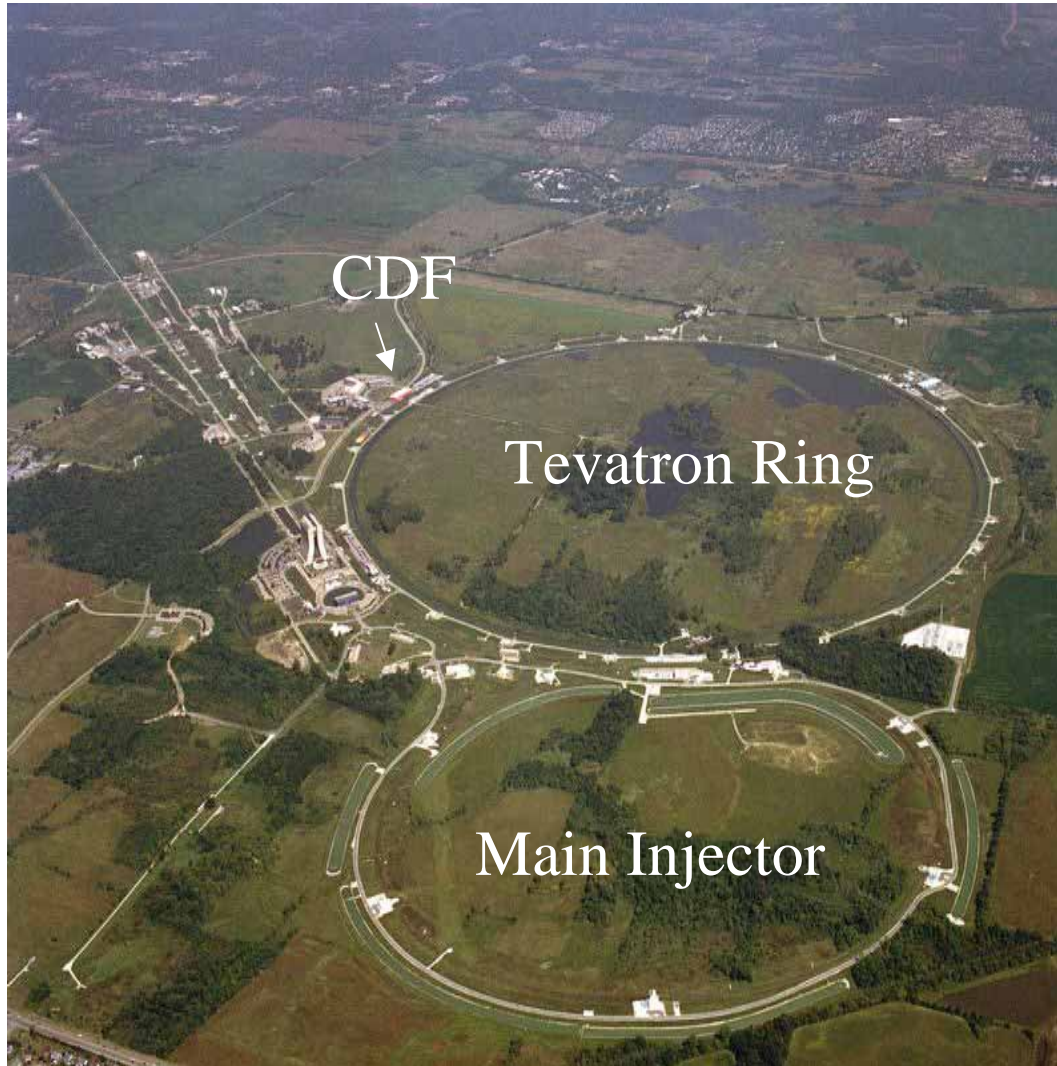


高エネルギー加速器研究機構(日本) KEK

ブルックヘブン国立加速器  
研究所(米国) BNL

スタンフォード線形加速器研究所(米国) SLAC

2TeV陽子反陽子衝突実験(CDF実験)  
米国フェルミ国立加速器研究所テバトロン加速器



RunI (1992～1996)

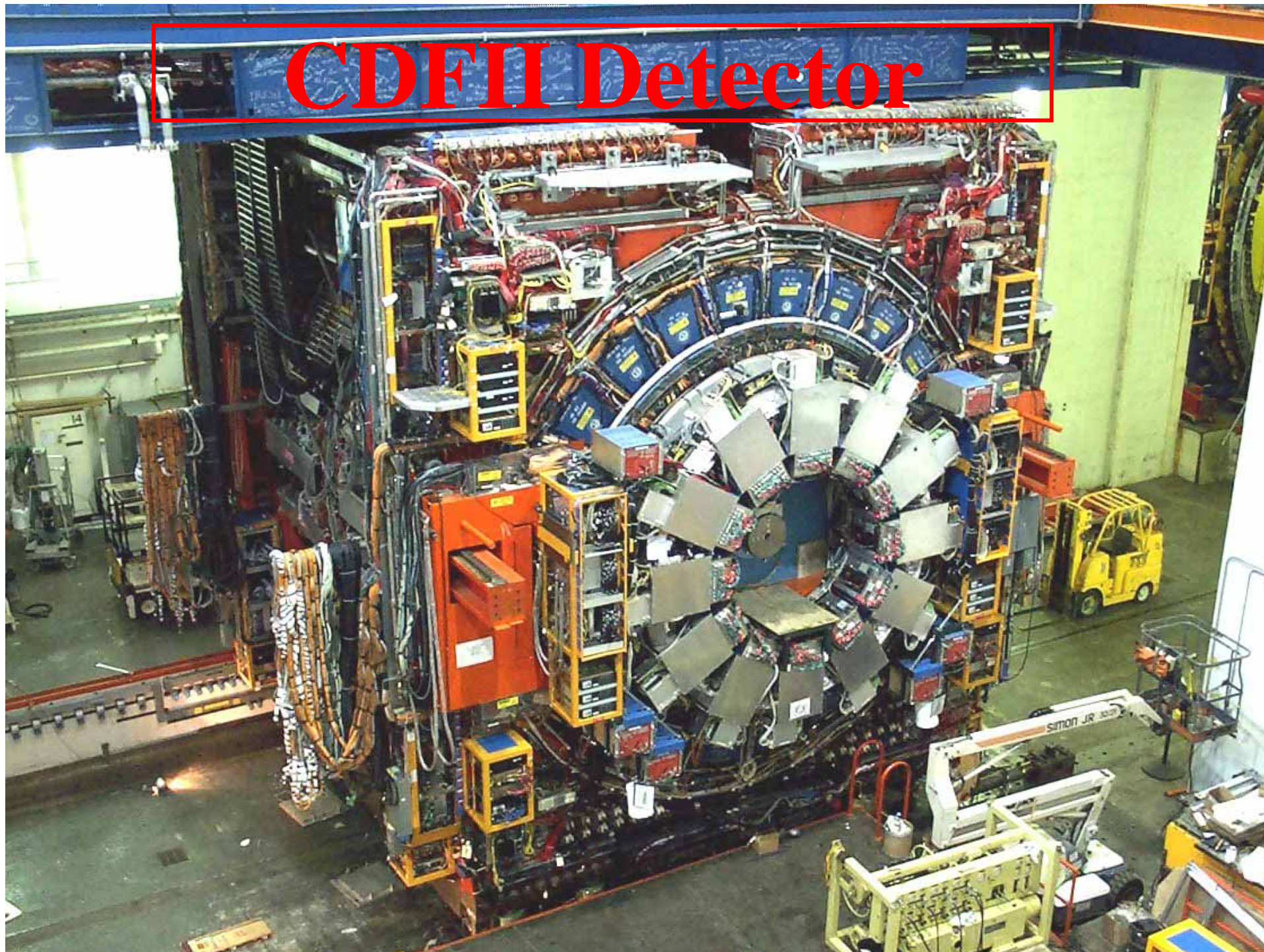
$\sqrt{s} = 1.8 \text{ TeV}$   
(  $110\text{pb}^{-1}$  )

RunII (2001～)

$\sqrt{s} = 1.96 \text{ TeV}$   
+ Main Injector

(  $9\text{fb}^{-1}$  の予定 )

# CDFII Detector

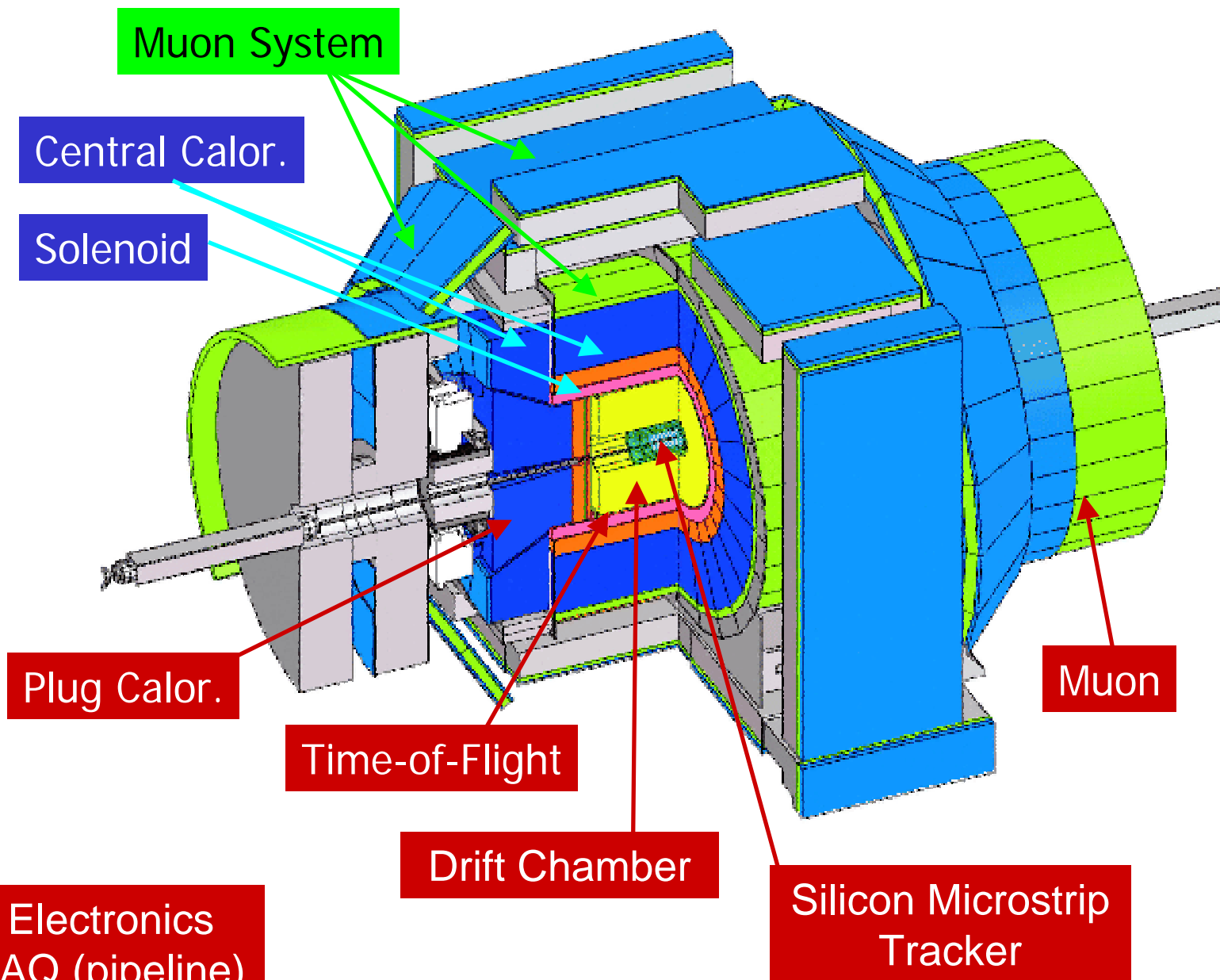




New

Old

Partially  
New



Front End Electronics  
Triggers / DAQ (pipeline)  
Online & Offline Software

# CDF実験の経過と主要な成果

陽子反陽子衝突実験(米国フェルミ国立加速器研究所)

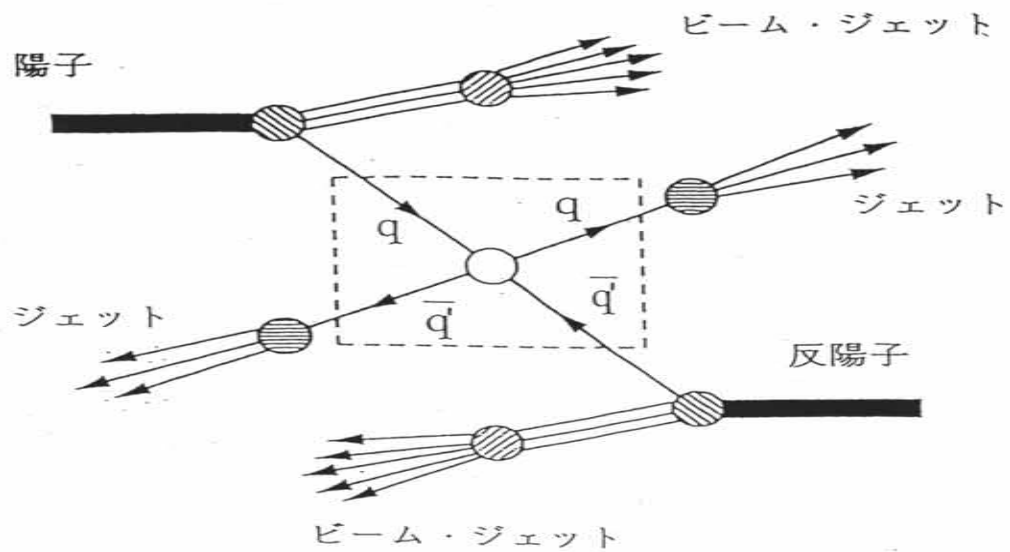
1981年8月 CDF設計報告書  
1985年10月 陽子反陽子初衝突  
1987年 テスト実験  
1988年6月 物理実験(Run0)  
～1989年5月

1992年4月 物理実験(Run1)  
～1996年2月  
1994年 トップクォーク発見  
1998年 Bc中間子発見

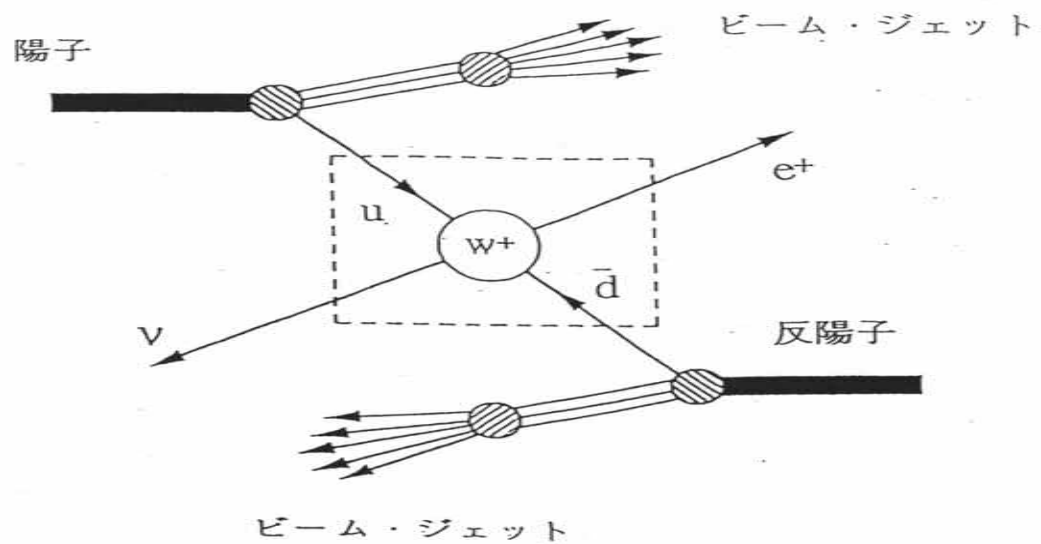
2001年4月～ 物理実験(Run2)再開  
ヒッグス粒子探索、B中間子のCP非保存、  
トップクォークの物理、電弱相互作用と強い相互作用、  
新粒子・新現象の探索。



(a)

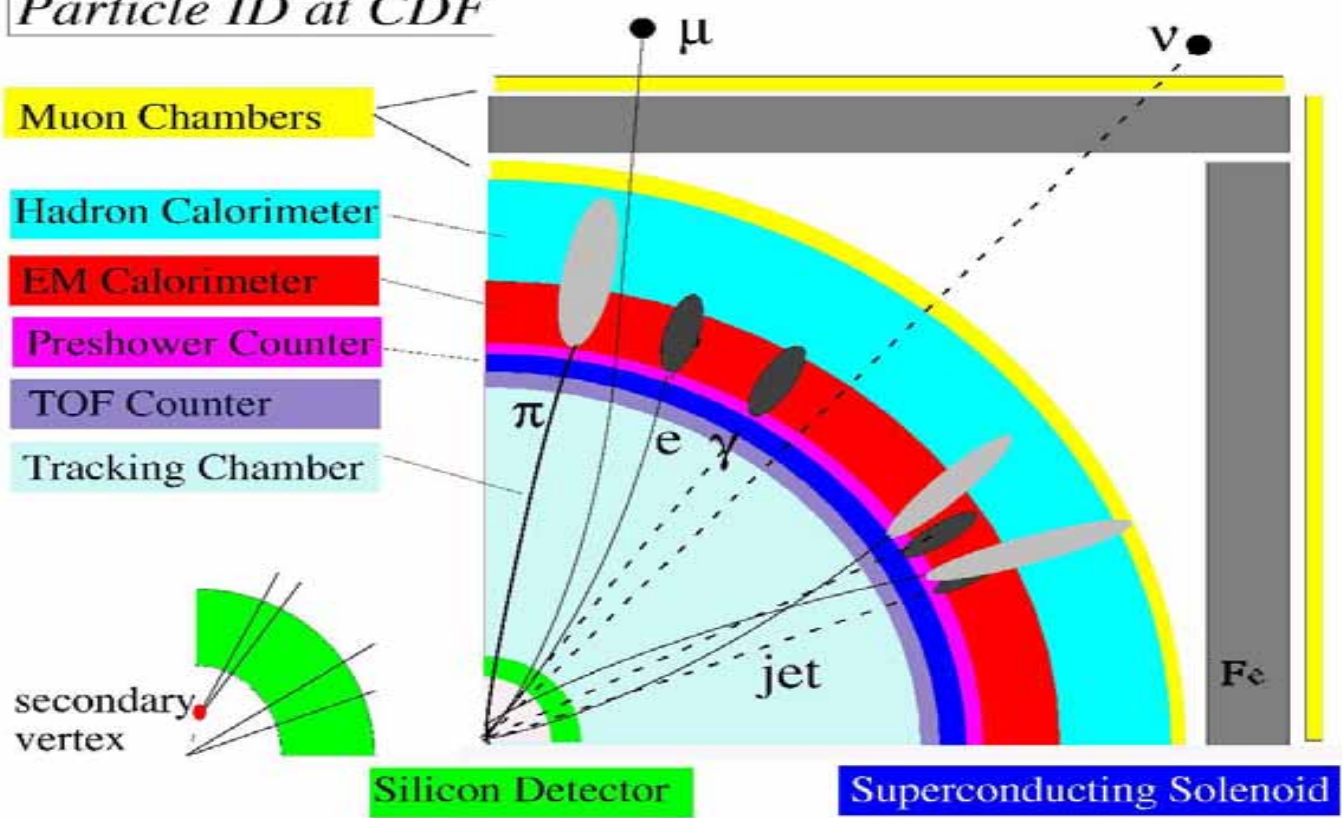


(b)





*Particle ID at CDF*



# トップクォークの発見

1977年のボトムクォーク発見以来、多くのコライダー実験でトップクォーク探索が行われた。

1978年～1986年

PETRA ( 46.8GeV電子陽電子衝突実験) at DESY(独)

1980年～1990年

PEP ( 30GeV電子陽電子衝突実験) at SLAC (米)

1981年～1990年

SppS ( 630GeV陽子反陽子衝突実験) at CERN (欧)

1987年～1995年

TRISTAN ( 64GeV電子陽電子衝突実験) at KEK (日)

1987年～

TEVATRON ( 1.8TeV陽子反陽子衝突実験)  
at Fermilab (米)

# CDF実験設計報告書 ( Design Report )

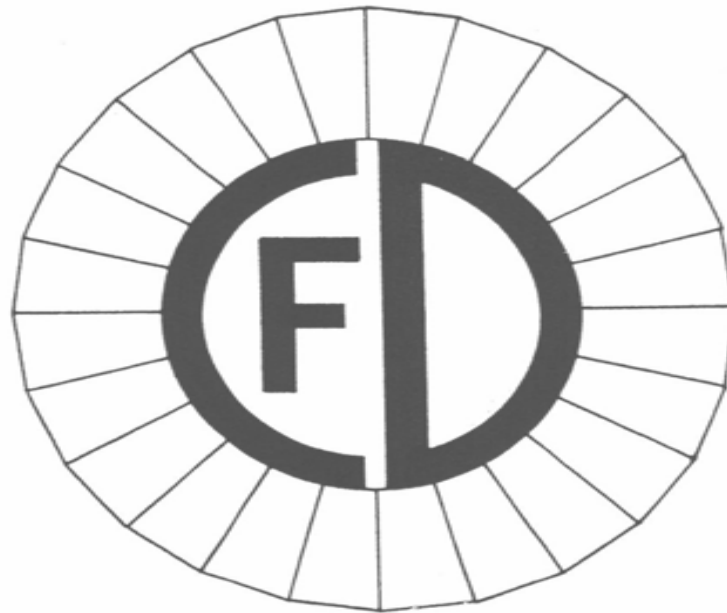
DESIGN REPORT

FOR THE

FERMILAB COLLIDER DETECTOR FACILITY

(CDF)

AUGUST, 1981



共同実験者 90名

# CDF全体グループミーティングでの解析報告

---

## 「トッパークォーク生成の証拠」発表の8ヶ月前

### Update on PLR Analyses

( Dilepton and  $W ( \rightarrow e\nu \text{ or } \mu\nu ) + \geq 4 \text{ jets}$  channels )

July 15, 1993

S. Kim, K.Kondo and R.Oishi

- 1 DLM Analysis in the dilepton channel
  - 2 KLM Analysis in the  $W ( \rightarrow e\nu \text{ or } \mu\nu ) + \geq 4$  jets channels
- Parton Level full Reconstruction ( PLR )
    - Likelihood Method with the use of Dynamics ( DLM )
    - Likelihood Method with Kinematics only ( KLM )

# KLM analysis in the $W ( \rightarrow \mu \text{ or } e + \nu ) + \geq 4 \text{ jets}$ channel

July 15, 1993

S. Kim, K.Kondo and R.Oishi

## 1 Event Selection

$W ( \rightarrow \mu \nu ) + \geq 4 \text{ jets}$  sample

$\int L dt \sim 20 \text{ pb}^{-1}$

We used Muon W sample CDF§W\_Z\_DATA:[ANA.W\_MUON] W\_EVENTS\_PART\_X.PAD ( where X = A, B, C, D and E ) made by Mark Krasberg. His cuts are shown below.

- MUON\_BANK\_TYPE\_CUT CMUO\_ONLY
- $P_T > 18 \text{ GeV}$
- CHA\_ENERGY  $< 6.0 \text{ GeV}$
- CEM\_ENERGY  $< 2.0 \text{ GeV}$
- CMU\_DX  $< 2.5 \text{ cm}$
- CMP\_DX  $< 10.0 \text{ cm}$
- CMX\_DX  $< 8.0 \text{ cm}$
- Corrected Missing  $E_T > 18 \text{ GeV}$

Then, we applied the following cuts in addition.

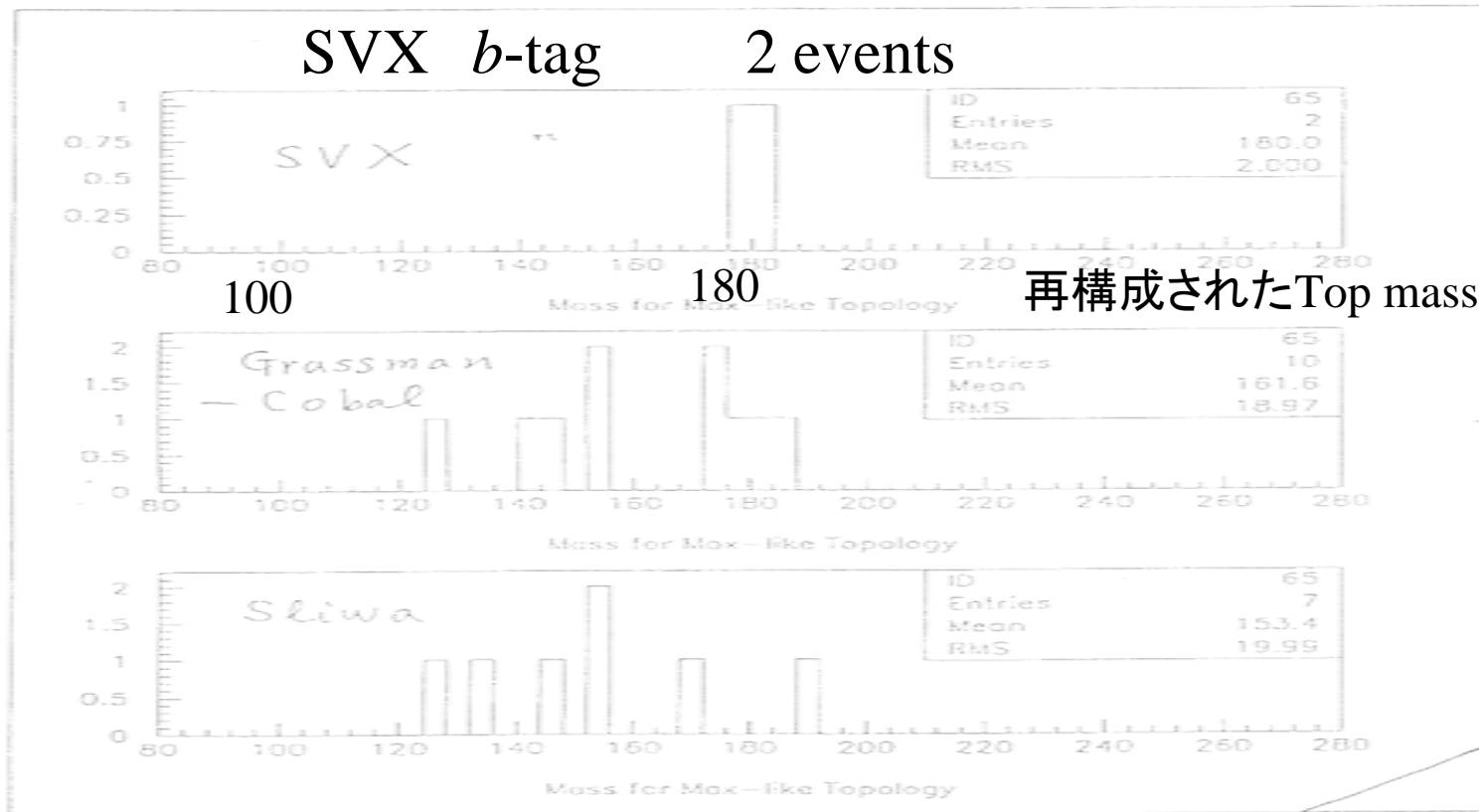
Muon  $P_t > 20 \text{ GeV}$

Neutrino Missing  $E_t > 20 \text{ GeV}$

Jets Number of jets  $\geq 4$  ( Corrected Jet  $E_t > 15 \text{ GeV}$  )

< Overlaps with other event samples >

### Mass for Maximum-Likelihood Topology



2/3

1:  $\chi^2$  cut

10/12

2: 4 jets cut

7/18

6:  $E_T$  cut

5: isolation

We should use a common set of energy correction.

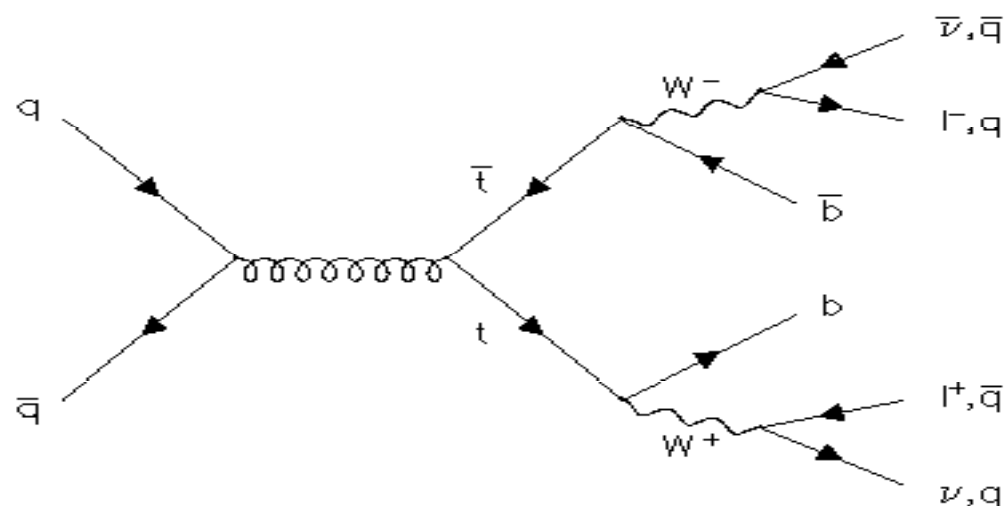
## 4 Summary

- DLM mass distribution of three dilepton top candidates has an average of 155 GeV in Joint Probability.
- We performed KLM analysis on the  $W ( \rightarrow \mu \text{ or } e + \nu ) + \geq 4$  jets data in the CDF 92/93 run ( integrated luminosity of  $20 \text{ pb}^{-1}$ ). We had an overlapping with two SVX\_b\_tagging events with a mass around 180 GeV, 10 Cobal-Grassman events with mass from 120 to 180 GeV and 7 Sliwa events with a mass from 120 to 190 GeV.
- KLM mass distribution for  $W + \geq 4$  jets data shows some enhancements around 150 GeV ( about 20 events ) and 180 GeV ( about 7 events ). We need more VECBOS  $W +$  jets events to estimate the background mass spectra.

SVX b-tag 2 events



## CDFでのトップクォーク対生成の同定



### ● Dilepton チャンネル

$$t\bar{t} \rightarrow W^+ b W^- \bar{b} \rightarrow l^+ l^- \nu \bar{\nu} b \bar{b}$$

事象選別の信号:  $l^+, l^-, \text{missing ET}, 2 \text{ jets}$

◎ b tagging は要求しない。

### ● Lepton + Jets チャンネル

$$t\bar{t} \rightarrow W^+ b W^- \bar{b} \rightarrow l^\pm \nu q' \bar{q} b \bar{b}$$

事象選別の信号:  $l^\pm, \text{missing ET}, \geq 3 \text{ jets}, b \text{ tagging}$

### ● Multi-Jets ( All Hadronic )チャンネル

$$t\bar{t} \rightarrow W^+ b W^- \bar{b} \rightarrow q' \bar{q} q' \bar{q} b \bar{b}$$

事象選別の信号:  $\geq 5 \text{ jets}, \Sigma \text{ ET}, b \text{ tagging}$

b tagging:

◎ silicon vertex detector (SVX) で b の崩壊点を検出。

◎ b 崩壊から来る低  $p_T$  の soft lepton を検出 (SLT)。



# トップクォーク候補事象の一例

## e + 4 jet event

40758\_44414

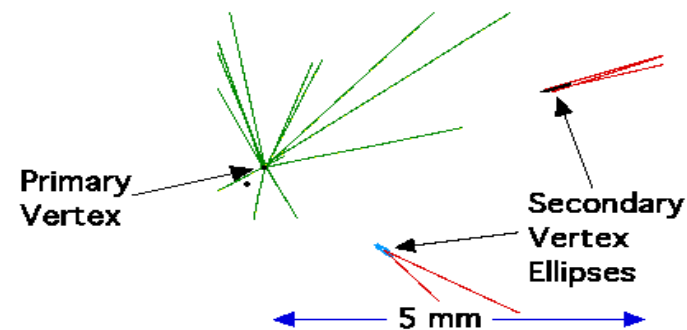
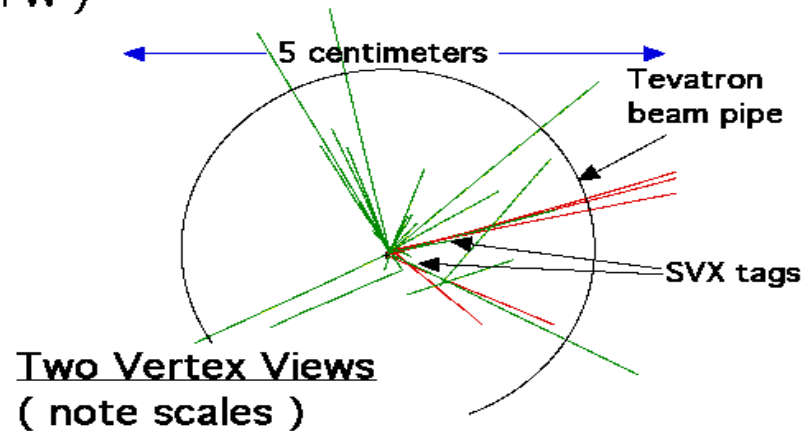
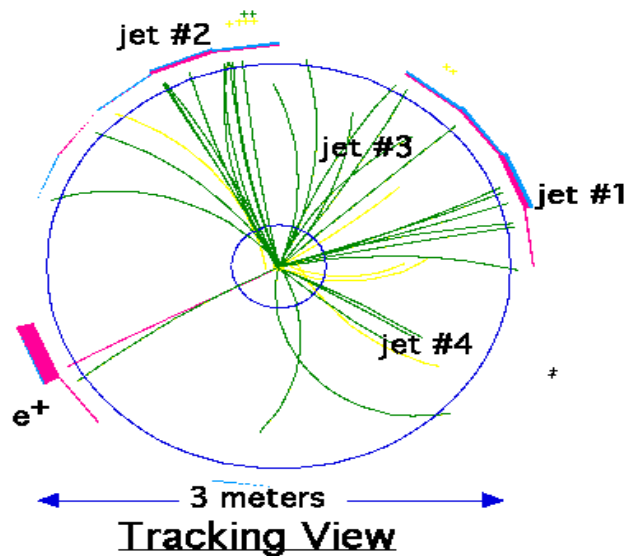
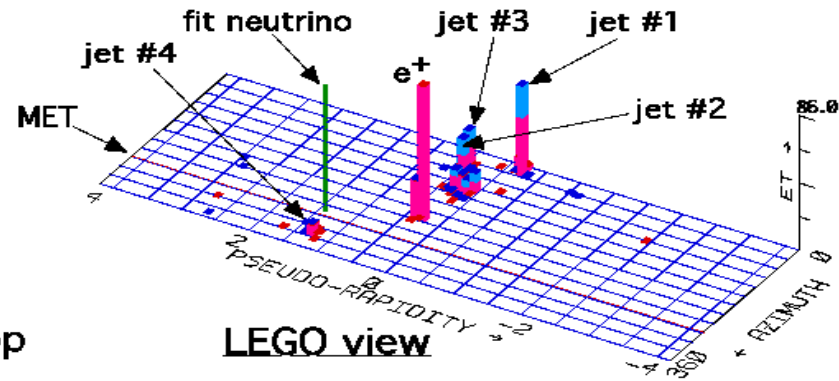
24-September, 1992

TWO jets tagged by SVX

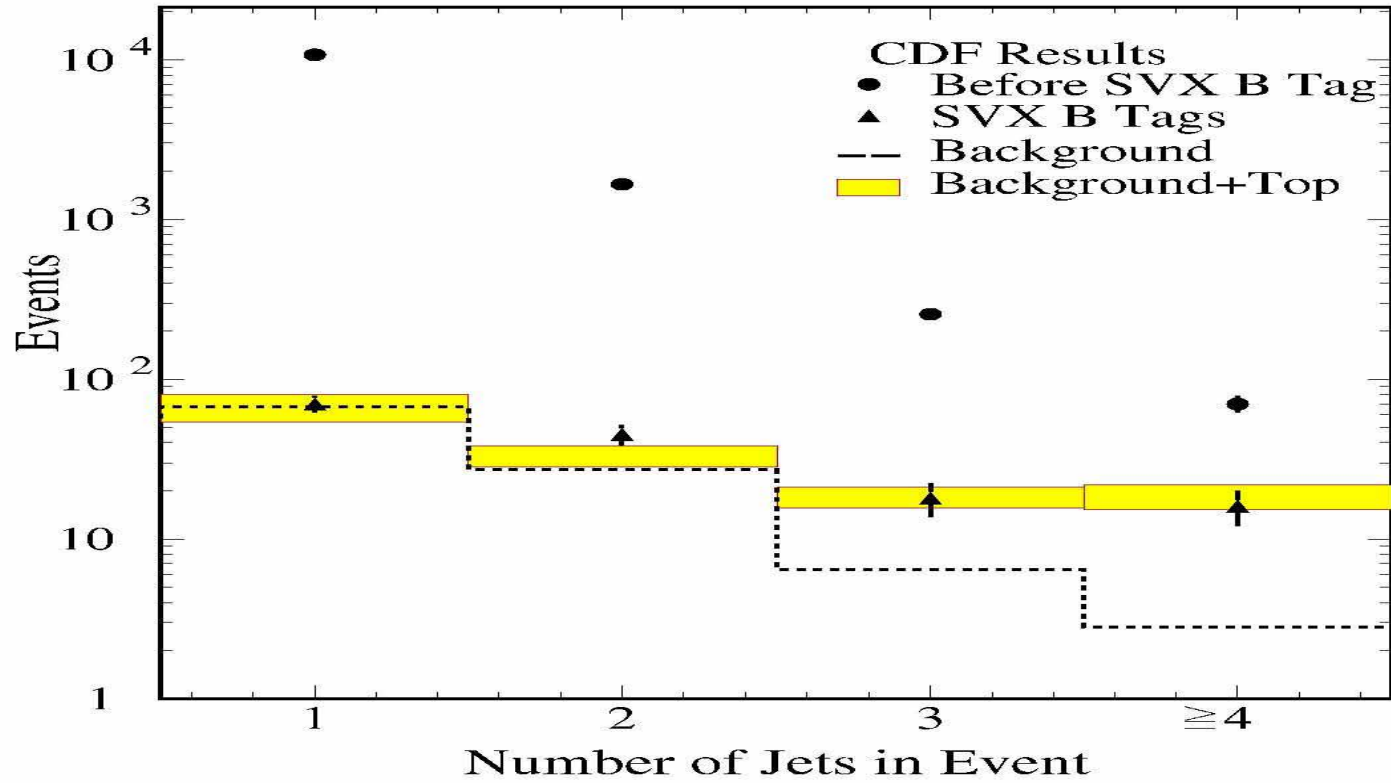
fit top mass is 170 +/- 10 GeV

e<sup>+</sup>, Missing E<sub>T</sub>, jet #4 from top

jets 1,2,3 from top ( 2&3 from W )



# W( $\rightarrow 1\nu$ )+ジェット事象のジェット数分布



# トップクォークの質量の直接決定

Lepton +  $\geq 3$  jets 事象のサンプルから 4 jets の事象を選ぶ。

第 4 ジェットの ET は 8 GeV 以上であればよい。

ジェットが 5 個以上あるときは  $E_T$  の高い順に 4 個とる。

Lepton + 4 jets 事象を  $t\bar{t}$  生成を仮定して運動学的に再構成する。

$$p p \rightarrow t_1 + t_2 + X$$

$$t_1 \rightarrow W_1 + b_1$$

$$t_2 \rightarrow W_2 + b_2$$

$$W_1 \rightarrow l + \nu$$

$$W_2 \rightarrow j_1 + j_2$$

全てのジェットの組み合わせを試す。

b tag 付きジェットは  $b_1$  または  $b_2$  とする。

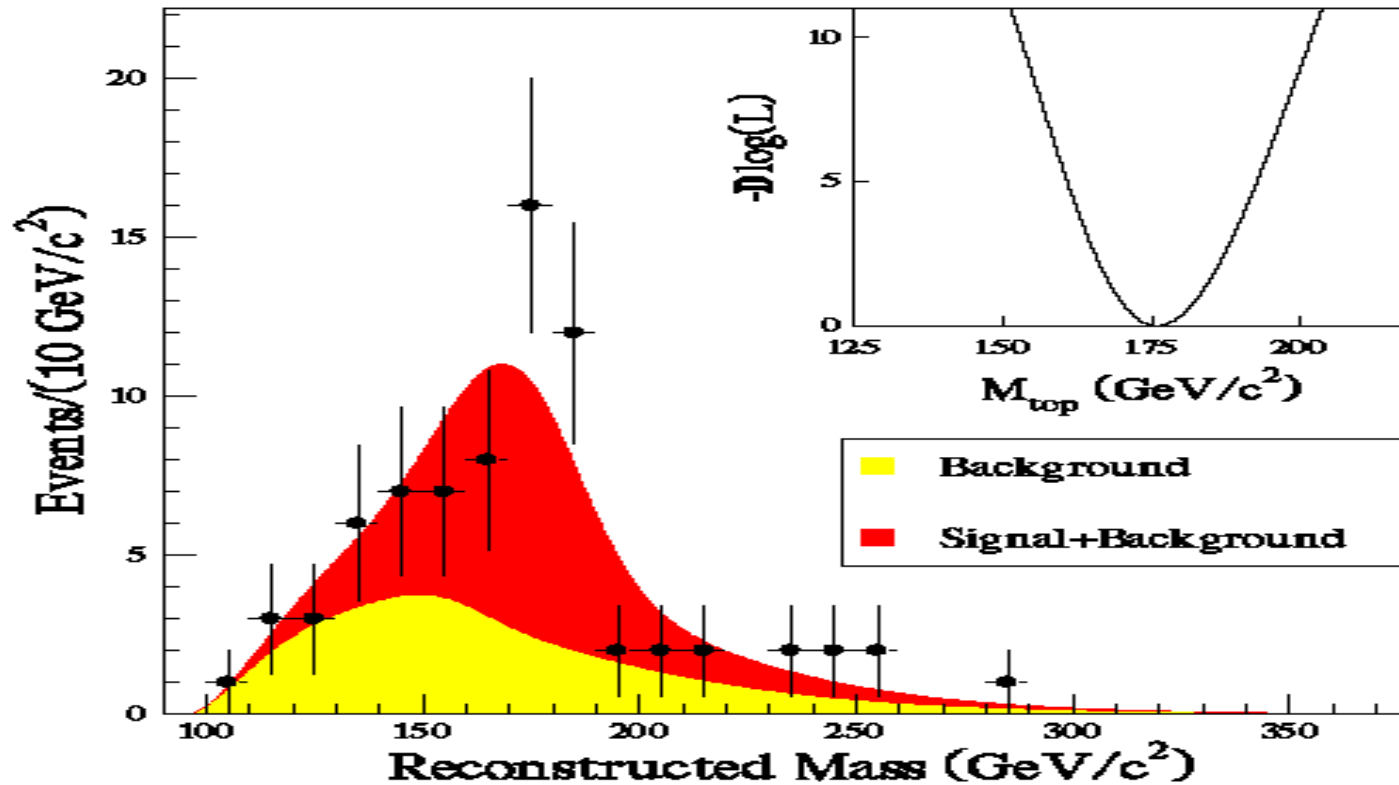
$P_z(\nu)$  の 2 つの解を試す。

ジェットのエネルギーは測定精度の範囲内でスキャン。

各事象に対し多重解。 $\chi^2$  最小の解を再構成質量とする。

163 個の Lepton + 4 jets 事象中フィットできたのは 153 個。

# レプトン+4ジェット事象のトップクォーク質量分布: 76事象(4つのサブサンプルの和)



$$M_{\text{top}} = 175.9 \pm 4.8 \text{ (stat)} \pm 4.9 \text{ (syst)} \text{ GeV}/c^2 = 175.9 \pm 6.9 \text{ GeV}/c^2$$

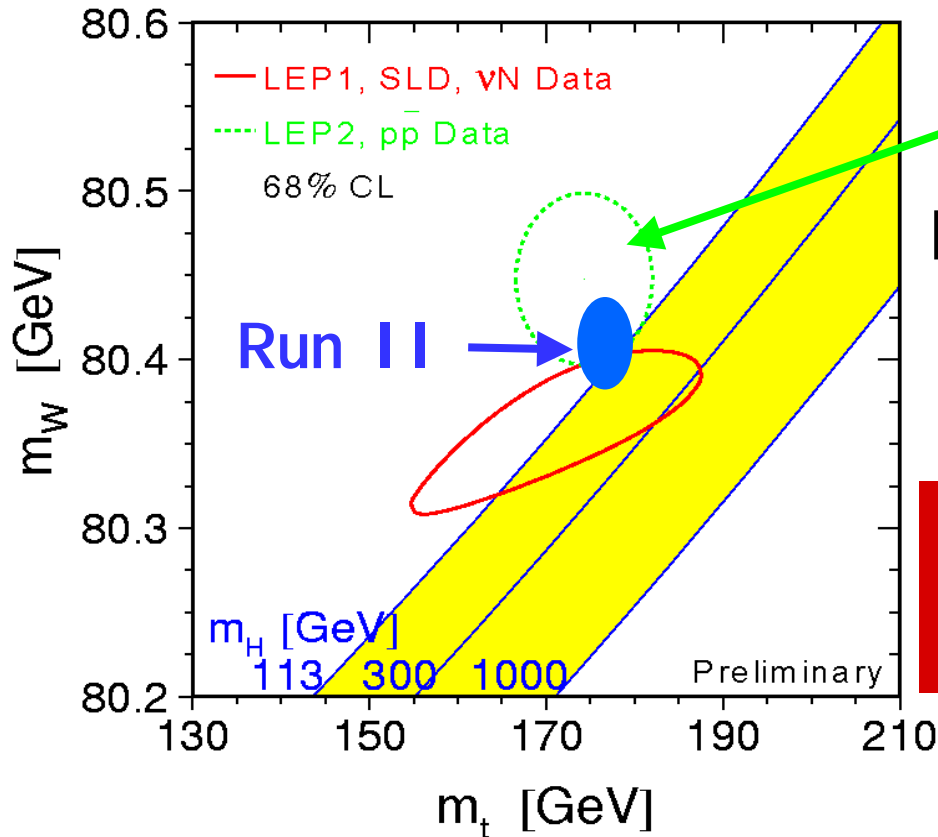
Combined CDF results ( all channels )

$$M_{\text{top}} = 176.1 \pm 6.6 \text{ GeV}/c^2$$

Combined Tevatron results ( CDF + D0 )

$$M_{\text{top}} = 174.3 \pm 5.1 \text{ GeV}/c^2$$

# トップクォークとWボソン質量測定による ヒッグス粒子の間接探索



テバトロン実験 Run I の成果：  
 $M_{\text{top}} = 174.3 \pm 5.1 \text{ GeV}/c^2$   
 $M_W = 80.452 \pm 0.062 \text{ GeV}/c^2$

青田 慎(筑波大)博士論文  
 湊 浩之(筑波大)博士論文

ヒッグス粒子の質量に与えられる  
 現在の制限： $M_{\text{Higgs}} < 211 \text{ GeV}$   
 @95%CL

Run ( ~ 2005年末 ) :

$$M_{\text{top}} < 3 \text{ GeV}/c^2$$

$$M_W \sim 30 \text{ MeV}/c^2$$

$$M_{\text{Higgs}} \sim 30\%$$

# B<sub>c</sub>中間子の発見

## 15種類の基本的な中間子

$\bar{u}$	$\bar{d}$	$\bar{s}$	$\bar{c}$	$\bar{b}$	
$u\bar{u}$ $\pi^0, \eta, \eta'$	$u\bar{d}$ $\pi^+$	$u\bar{s}$ $K^+$	$u\bar{c}$ $\bar{D}^0$	$u\bar{b}$ $B^+$	u
	$d\bar{d}$ $\pi^0, \eta, \eta'$	$d\bar{s}$ $K^0$	$d\bar{c}$ $D^-$	$d\bar{b}$ $B^0$	d
		$s\bar{s}$ $\eta, \eta'$	$s\bar{c}$ $D_s^-$	$s\bar{b}$ $B_s$	s
			$c\bar{c}$ $J/\psi$	$c\bar{b}$ $B_c^+$	c
				$b\bar{b}$ $\Upsilon$	b

トップクォークは寿命が $10^{-24}$ 秒とハドロン化の時間 ( $10^{-23}$ 秒) よりも短いので、ハドロンになる前に崩壊する。

## 1998年3月 : CDF実験で発見

*F. Abe et al., PR D58, 112004(1998)*

## 発見以前の理論予言

$B_c$ 中間子の質量:  $6.27 \pm 0.02 \text{ GeV}/c^2$       *E. Eichten et al., PR D49, 5845(1994)*

$B_c$ 中間子の寿命:  $0.4 \sim 1.4 \text{ psec}$       *M. Beneke et al., PR D53, 4991(1996)*

# 国際会議等での発見報告

1998年3月 Moriond QCD, Les Arcs, France “Rare Decays, Mixing and CP Violation Studies” by Jun-Ichi Suzuki (University of Tsukuba)

1998年3月 Seminar at Fermilab, Batavia, USA “Observation of  $B_c$  mesons in 1.8-TeV pp collisions” by Shinhong Kim (University of Tsukuba)

1998年3月 La Thuile, Aosta Valley, Italy “Beauty Physics” by Prem Singh (University of Pittsburgh)

1998年3月 Seminar at Oxford University, Oxford, England “Observation of  $B_c$  mesons in 1.8-TeV pp collisions” by Todd Huffman (University of Pittsburgh)

日本物理学会誌 Vol. 53, No. 9, 1998

最近の研究から

## 重いクォークの束縛状態 $B_c$ 中間子の発見

金 信弘

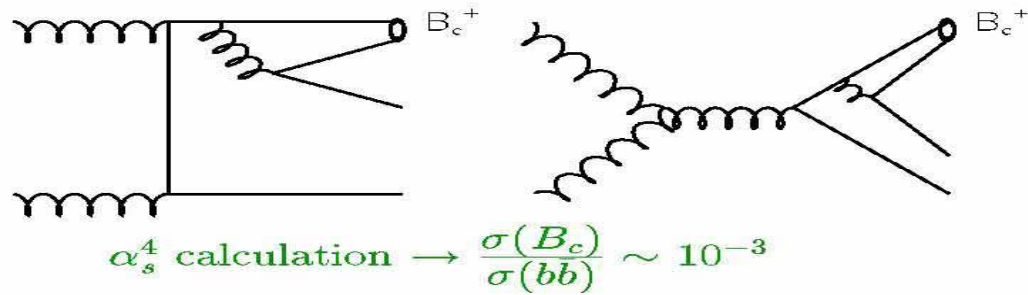
〈筑波大学物理学系 305-8571 つくば市天王台 1-1-1 e-mail: skim@hep.px.tsukuba.ac.jp〉

鈴木潤一

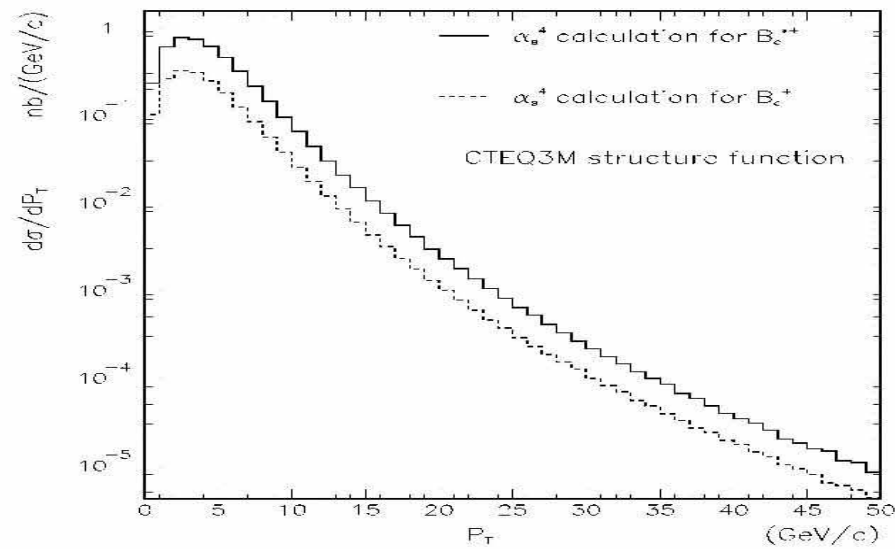
〈高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所 305-0801 つくば市大穂 1-1 e-mail: jsuzuki@bmail.kek.jp〉

1947年の $\pi$ 中間子の発見以来、現在までに多くの中間子が発見されてきた。15種類ある基本的な中間子のうち未発見なものは反ボトム ( $b$ ) クォークとチャーム ( $c$ ) クォークの束縛状態である  $B_c$  中間子のみとなった。この最後の中間子である  $B_c$  中間子の発見に成功した。この  $B_c$  中間子は重いクォークの束縛状態であるために構造の計算が高精度でできるので、今後、強い相互作用の研究に役立つことが期待される。

## Theoretical Calculations of $B_c$ Production



$p_T$  spectrum for  $B_c(1^1S_0)$  and  $B_c^*(1^3S_1)$  by C. Chang *et. al.*, PRD 54(1996) 4344.





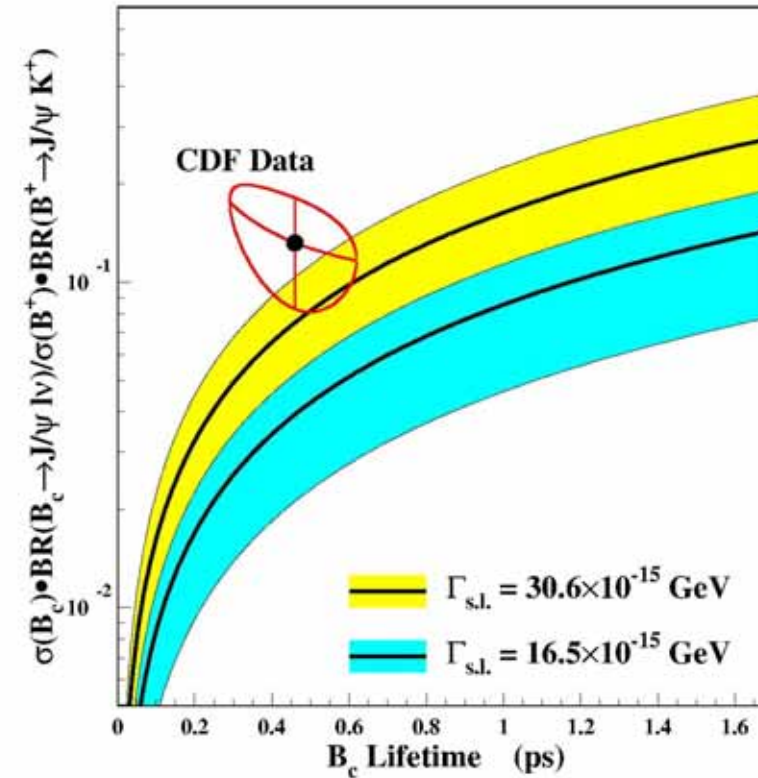
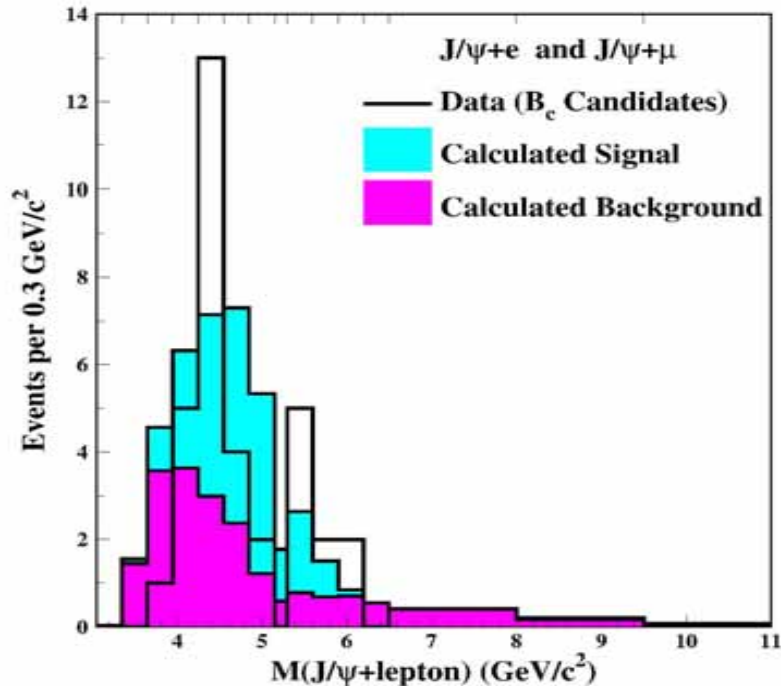
# $B_c$ 中間子の発見(1998年)

鈴木潤一(筑波大)博士論文

$B_c$ 中間子: ボトムクォークとチャームクォークの束縛状態。  
15種類の基本的な中間子のうち、最後に発見された。

生成断面積と分岐比の積 vs 寿命

$B_c \rightarrow J/\psi l \nu$ 崩壊モード  
の $J/\psi+l$ の不変質量分布



$$N(B_c) = 20.4^{+6.2}_{-5.6}$$

$$\tau(B_c) = 0.46 \pm 0.18 \text{ ps}$$

$$\frac{\sigma(p\bar{p} \rightarrow B_c X) \text{BR}(B_c \rightarrow J/\psi \ell \nu)}{\sigma(p\bar{p} \rightarrow B_u X) \text{BR}(B_u \rightarrow J/\psi K)} = 0.132^{+0.061}_{-0.052}$$

# 重さの正体 つかまえる

物には重さがある。当たり前のように、物理学的に説明しようとするところ、簡単に「質量のかきかき」で済ませる。質量の存在を示す粒子ヒッグスの存在を示す。これまで最も信頼度の高いデータが、欧州合同原子核研究機関(CERN)の加速器実験で得られた。世界中の素粒子物理学者が探し続けてきた粒子で、現代物理学の基礎となっている「標準理論」を検証するだけでなく、「大統一理論」など新たな枠組みをつくり出す可能性がある。日米欧の大規模加速器計画にもはつきりがつきだ。

## カギ握る粒子「ヒッグス」 欧州チーム「存在示唆」

物質は原子の集まり。原子は電子と原子核の集まり。原子核は陽子と中性子の集まり。そして陽子と中性子はクオークの集まり。標準理論によれば、私たちの世界は、六種類のクオークと、電子など軽い粒子である六種類のレプトンからできている。標準理論では、不思議なことにこれらの粒子の質量はゼロでなければならない。



ヒッグス探しのため、運転期間が11月2日まで延長されたCERNの加速器LEP。スイスジュネーブの圏境にある(CERN提供)

ぶつかって、動きが鈍くなるため、質量があるように見えると説明された。未知の粒子は説明者にちなみ「ヒッグス」と呼ばれる。米国フェルミ国立加速器研究所の加速器「トロン」でヒッグスを探しに挑む金信弘・筑波大学教授によ

### 既存の加速器にチャンス

と。最近、一兆電子ボルト以下とされていたヒッグスの質量が、千五百億〜二千五百億電子ボルト下方修正された。これならCERNの運転中の加速器LEPや、トロンに能力でも見つかるともいえない。

### 大統一理論への糸口にも

ヒッグスが見つければ、重さの正体は解ける。私たちが世界にある四つの力のうち電磁気力と弱い力を統一して標準理論は検証されたことになる。さらに「物理学の次の枠組みも見えてくる」と駒宮さん。

### 懐疑な見方をする

「観測したのは、ヒッグスが崩壊したときのみ。約五通りのパターンのうち一通りだけ。残りの三グループはまだ有意な事象も観測していない。データ数が少ないので、科学的に確定できる段階ではない。た

だが、現実にはほとんどの粒子に質量がある。一九六〇年代に英国の物理学者ヒッグスがこの矛盾を解決する仕組みを提唱。宇宙にはある未知の粒子が満ちている。ほかの粒子はそれに

LEPは性能を上げ、四月から本格的にヒッグス探しを始めた。東京大学素粒子物理国際研究センターも加わる。「オパール」など四つの実験グループがあり、粒子の崩壊の様子などを観測している。

「四グループのうちの一つ「アレフ」がこのほど、ヒッグスの存在を示唆する現象を観測。四グループ分を合わせると、解析にもよるが、ヒッグスが存在しないときには一回程度しか観測されないまれな事象が五回

だ、あと二カ月実験で、これは、今回の原因がヒッグスかどうかはほぼ確定できる。LEPの運転は特別な準備がない限り、今年末で終わる予定だったが、今回の結果をうけて十一月までの約一カ月の延長が決まった。それまでに確定できるかどうかは「微妙なところ」(駒宮さん)。

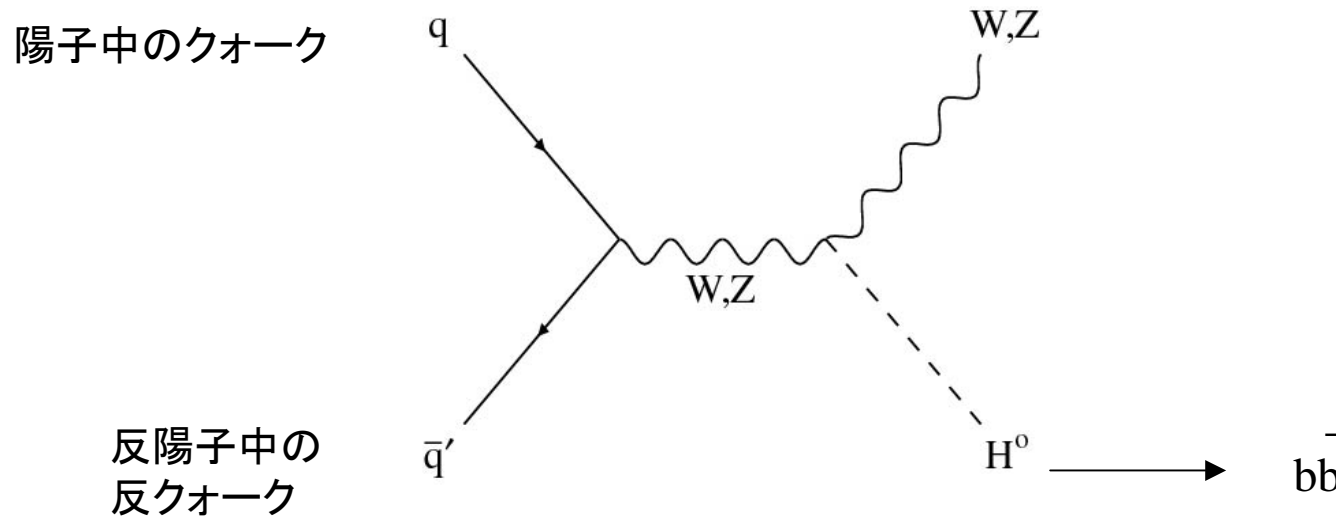
# ヒッグス粒子探索 についての記事

CERN研究所(ジュネーブ)でヒッグス粒子の候補事象が見えた。これが事実かどうかはフェルミ研究所での陽子反陽子衝突実験で明らかにできる。

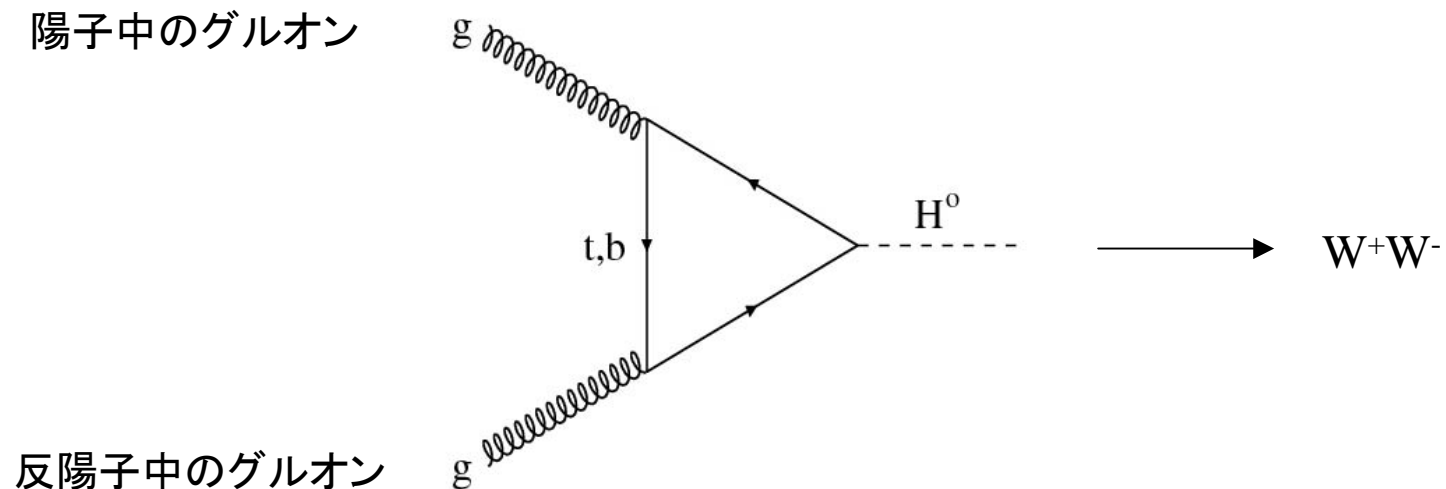
「LEPは性能を上げ、四月から本格的にヒッグス探しを始めた。東京大学素粒子物理国際研究センターも加わる。」「四グループのうちの一つ「アレフ」がこのほど、ヒッグスの存在を示唆する現象を観測。四グループ分を合わせると、解析にもよるが、ヒッグスが存在しないときには一回程度しか観測されないまれな事象が五回

# ヒッグス粒子の探索

## 軽いヒッグス粒子 ( $M_H < 150\text{GeV}/c^2$ )

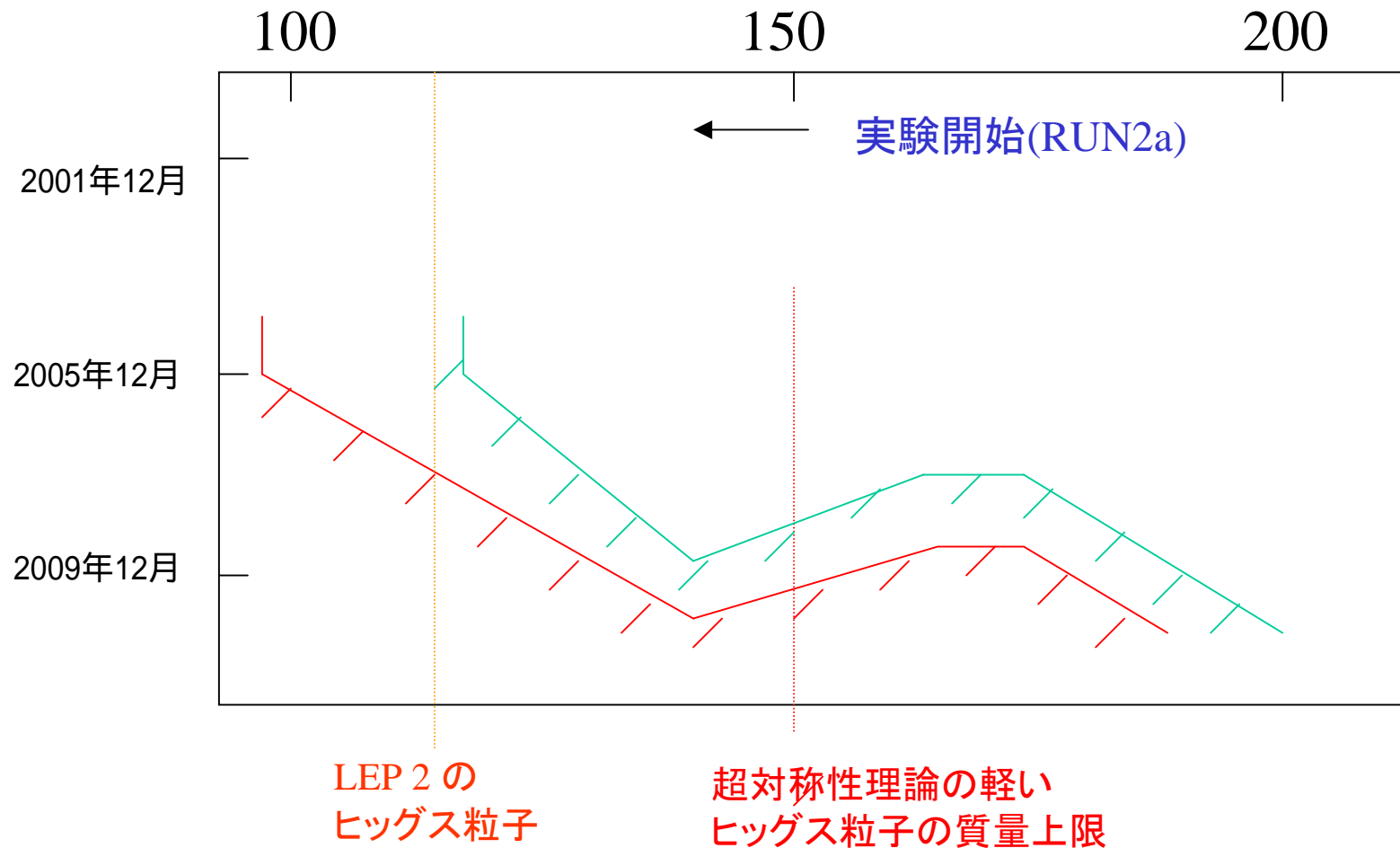


## 重いヒッグス粒子 ( $M_H > 150\text{GeV}/c^2$ )

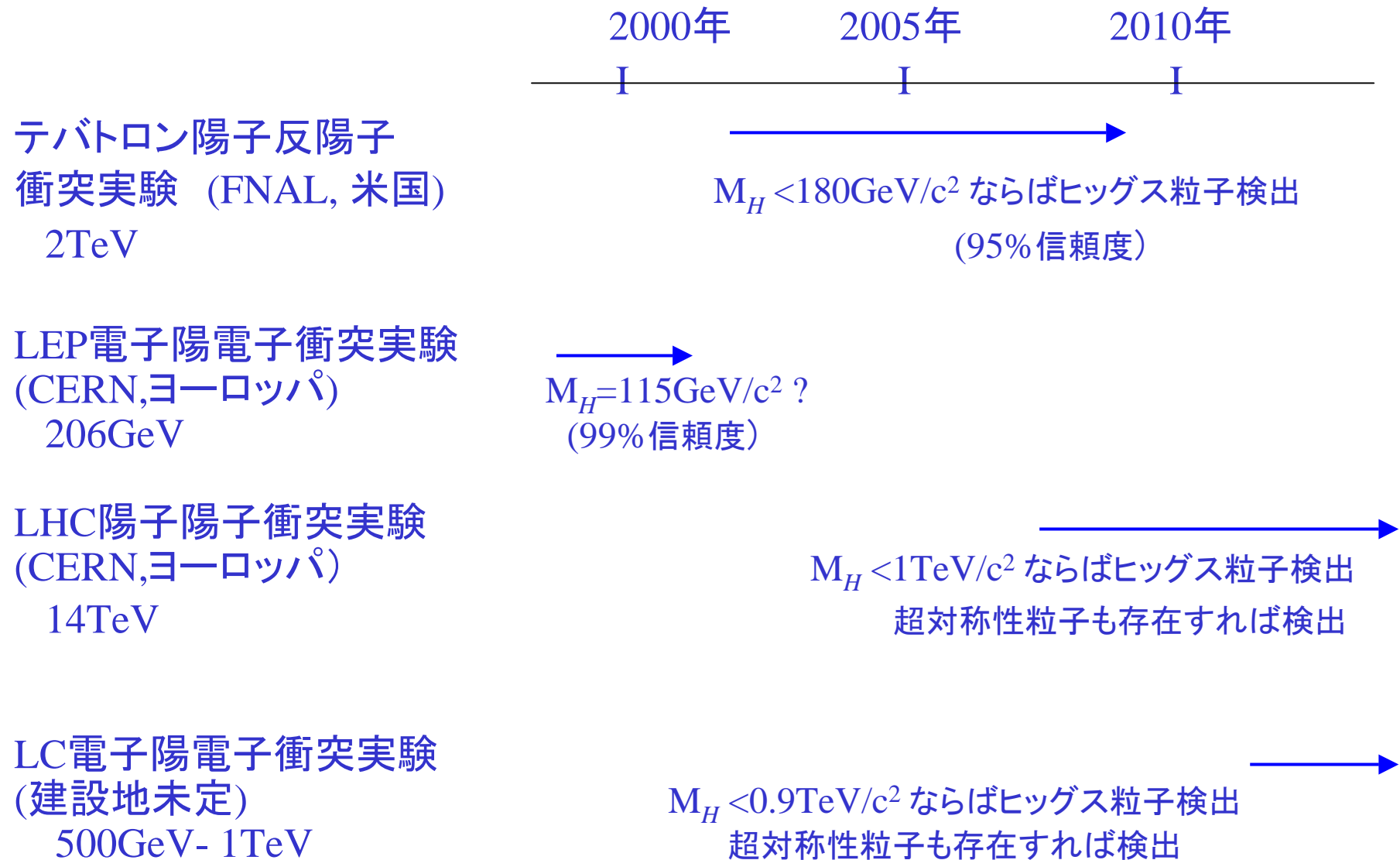


# テバトロン加速器での ヒッグス粒子探索

証拠検出可能なヒッグス粒子の質量  $M_H(\text{GeV}/c^2)$   
(95%信頼度で検出できる $M_H$ )



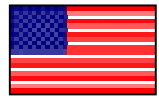
# 超高エネルギー衝突実験の現状と計画



BACKUP

# The CDF Collaboration

## North America



3 Natl. Labs  
28 Universities



1 Universities

## Europe



1 Research Lab  
6 Universities



1 University



4 Universities



2 Research Labs

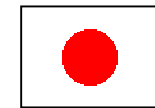


1 University



1 University

## Asia



5 Universities  
1 Research Lab



1 University



3 Universities

## Totals

**12 countries**

**58 institutions**

**581 physicists**

# CDF実験グループメンバー

Design Report (1981年)

Engineering Run (1988年時点)

参加国：3 人数：87名 (13)  
米国 57名 (9)  
イタリア 15名 (2)  
日本 15名 (2) 17%

参加国：3 人数：189名 (17)  
米国 146名 (13)  
イタリア 24名 (2)  
日本 19名 (2) 10%

Run 1 (1998年時点)

参加国：7 人数：445名 (大学・研究所：41)  
米国 276名 (22)  
イタリア 85名 (5)  
日本 48名 (5) 11%  
スイス 6名 (1)  
カナダ 10名 (1)  
台湾 13名 (1)  
ドイツ 10名 (1)

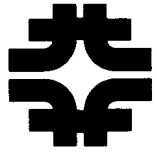
日本の内訳

筑波大学	27名 (教官10名、大学院生17名)		
KEK	4名	大阪市立大学	7名
広島大学	7名	早稲田大学	3名

その後、参加した大学・研究所

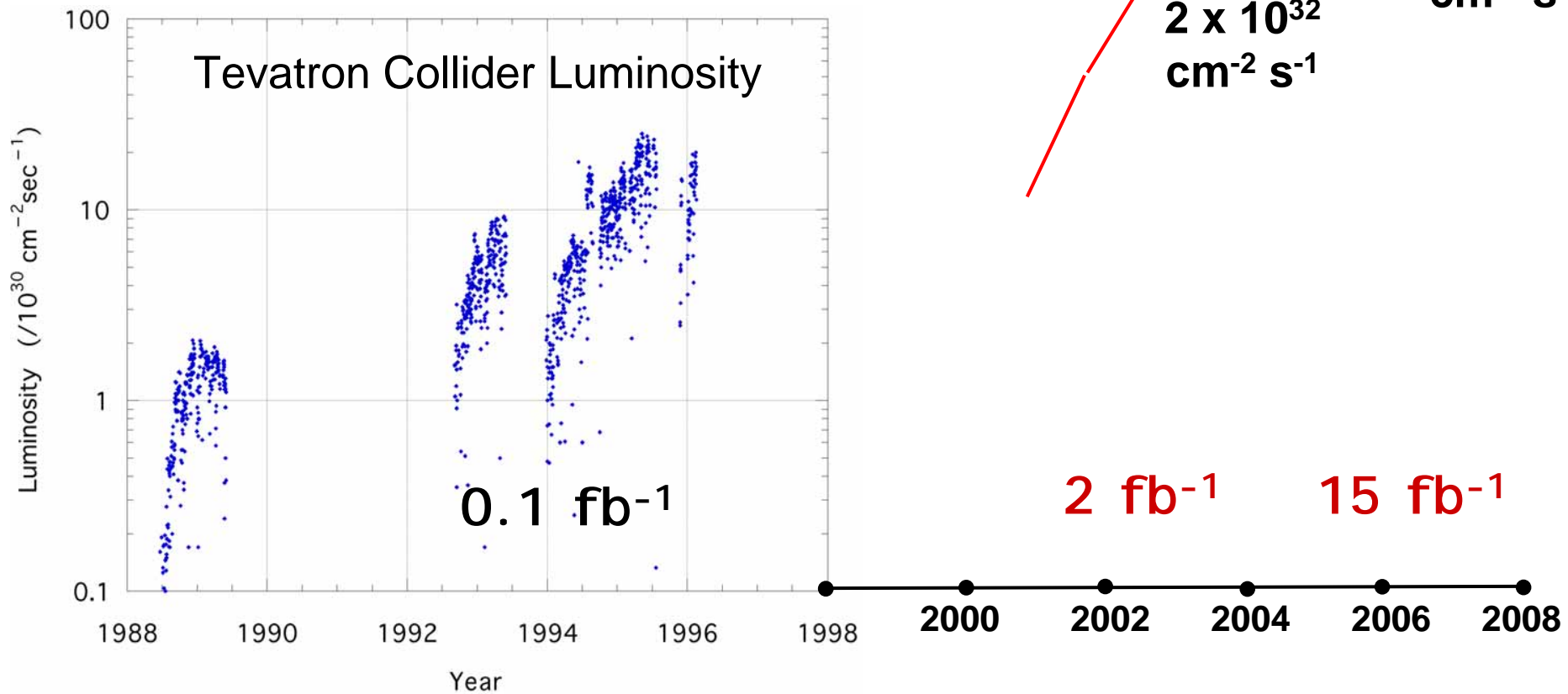
ITEP (ロシア)、Glasgow(英)、Oxford(英)、  
College of London(英)、KHEL(韓国)、岡山大学(日本)





# Tevatron History and Future

Discovery of top,  $B_c$ , ...  
 $M_W$ ,  $M_{top}$ ,  $\sin 2\beta$ , ... measurements



Run : 0                    Ia    Ib  
 $\sqrt{s}$  :                    1.8 TeV

IIa                    IIb  
1.96 TeV

# Tevatron status

- Tevatron operations started in March 2001

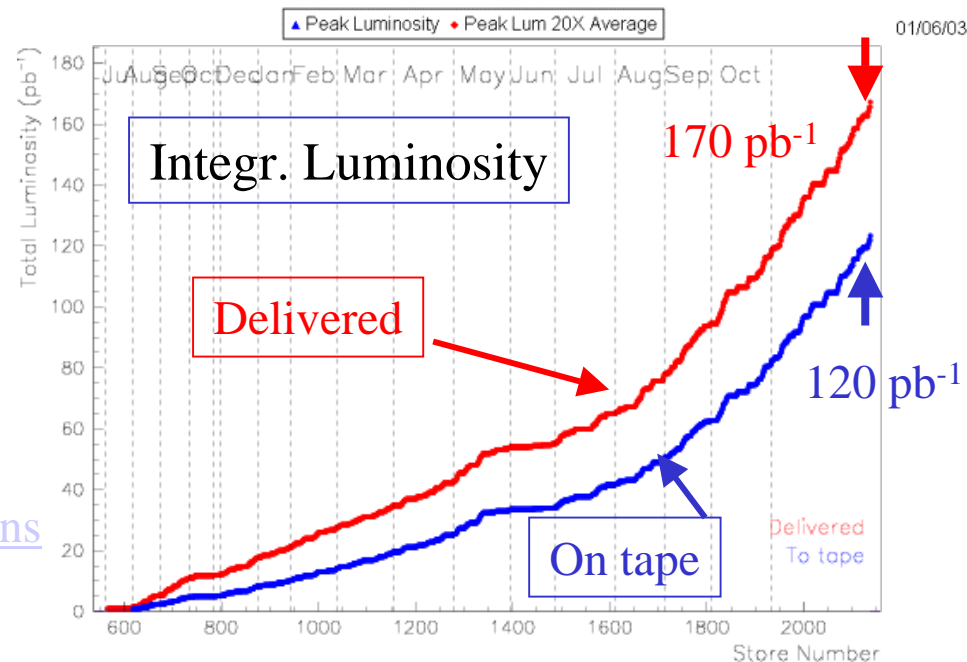
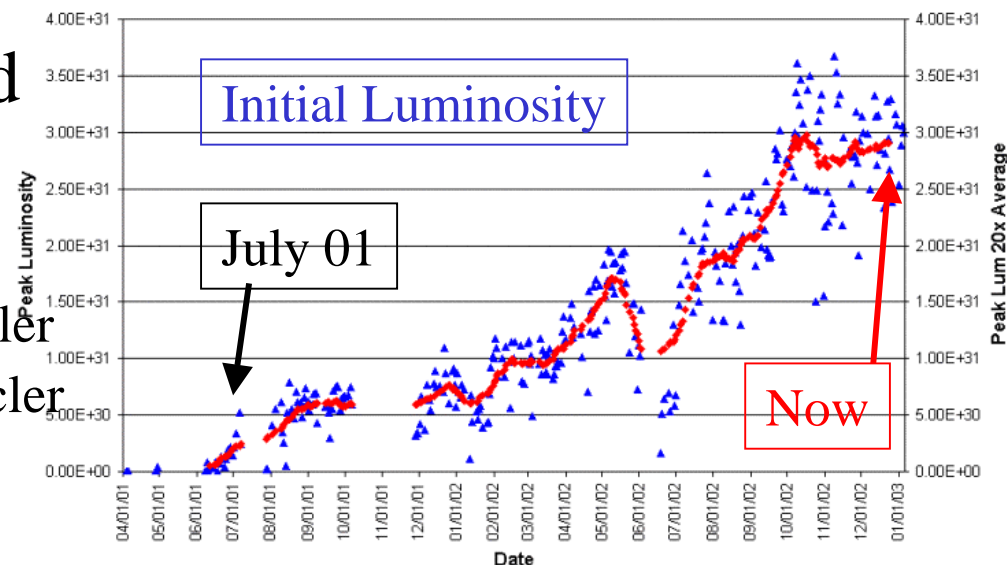
## Luminosity goals for run 2a:

- $5-8 \times 10^{31} \text{ cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$  w/o Recycler
- $2 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$  with Recycler

## Achieved:

- $3.8 \times 10^{31} \text{ cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$  in October '02
- Now recovered from June shutdown to improve p-bar cooling
- $170 \text{ pb}^{-1}$  delivered until January '03
  - $120 \text{ pb}^{-1}$  are on tape
  - $10 - 20 \text{ pb}^{-1}$  used for analyses shown here [\(details\)](#) [plans](#)

Collider Run IIA Peak Luminosity



## Table of Contents

	Page
Abstract	iii
1. <u>Physics Motivation</u>	1
1.1 <u>W, Z and other gauge particles</u>	2
1.2 <u>Heavy flavours</u>	8
1.3 <u>New Thresholds and New Particle Production</u>	10
1.4 <u>Hard Scattering Processes</u>	14
1.5 <u>Log s Physics</u>	17
2. <u>Overview of the CDF Detector</u>	47
3. <u>CDF Solenoid Magnet</u>	60
3.1 <u>Magnet Yoke</u>	61
3.2 <u>Superconducting coil and cryostat</u>	63
4. <u>Calorimetry</u>	73
4.1 <u>Central Electromagnetic shower counters</u>	75
4.2 <u>End plug Electromagnetic shower counters</u>	83
4.3 <u>Forward-Backward Electromagnetic shower counters</u>	91
4.4 <u>Central Hadron calorimeters</u>	93
4.5 <u>End wall Hadron calorimeters</u>	97
4.6 <u>End plug Hadron calorimeters</u>	100
4.7 <u>Forward-Backward Hadron calorimeters</u>	105
5. <u>Tracking</u>	148
5.1 <u>Cylindrical and Intermediate Tracking</u>	148
5.2 <u>Forward-Backward Tracking</u>	154
6. <u>Muon Detection</u>	174
6.1 <u>Toroid Magnet Muon System</u>	174

← **Top quark Search**

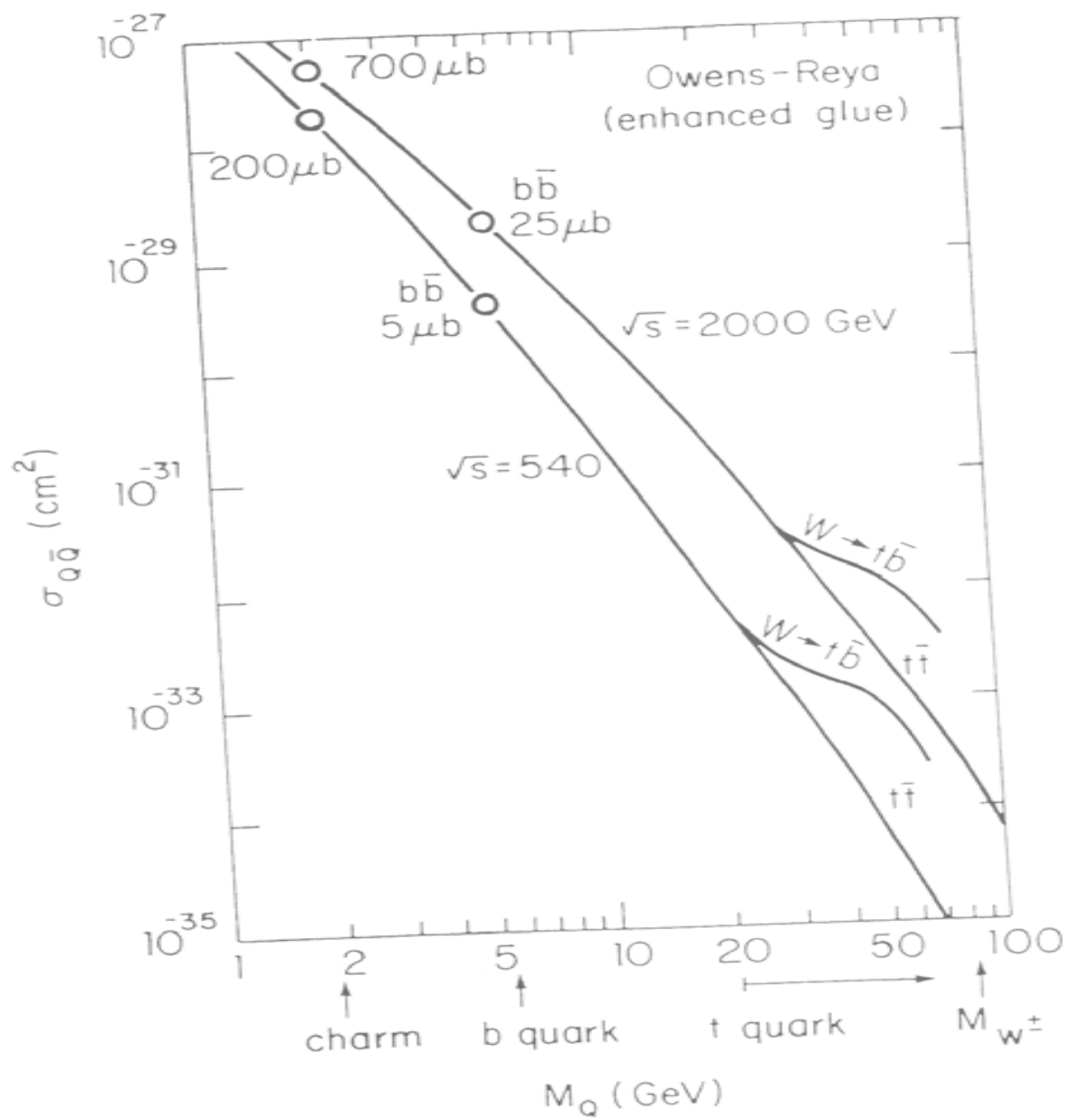


FIG. 1.8

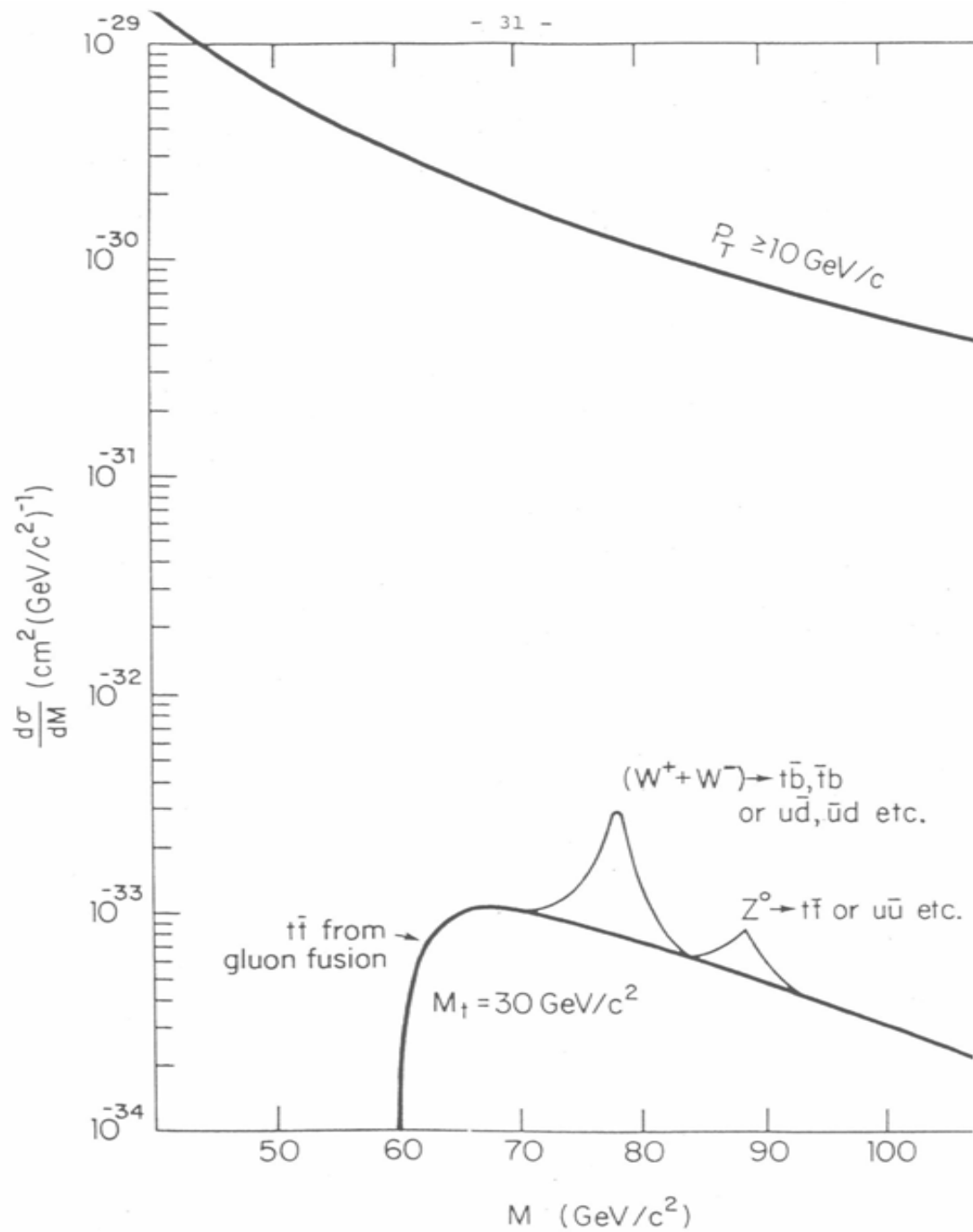


FIG 1 5

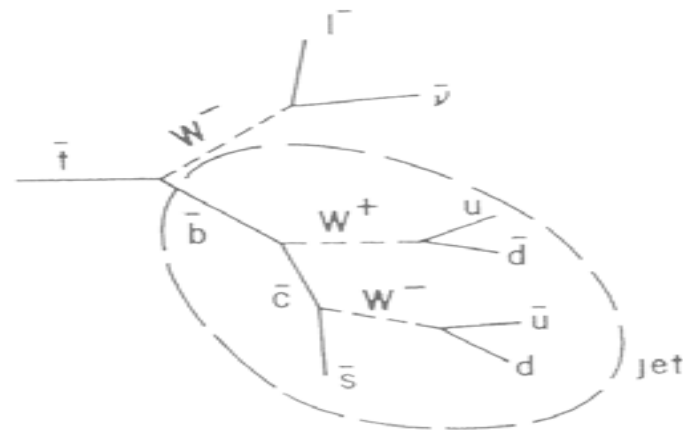
### 10.3 PRODUCTION AND DETECTION OF TOP QUARKS

We have considered various techniques for detecting top quarks. In standard QCD models the top quark production cross section depends strongly on the quark mass and the optimum detection technique is consequently mass-dependent. From the results at PETRA, it is unlikely that the top quark mass is less than  $18 \text{ GeV}/c^2$ . To be definite, we have considered a reference top quark with a mass of  $25 \text{ GeV}/c^2$ .

$$M_{\text{top}} = 25 \text{ GeV}/c^2$$



Hadronic W Decay



Leptonic W Decay

Category	Topology	Approximate Branching Ratio
A	3 jets, no leptons	40%
B	1 jet, separated leptons	30%
C	3 jets, leptons imbedded in one jet	30%

Very Heavy Top Quarks

What if the mass of the top quark is very large,  $m_t = 150 \text{ GeV}/c^2$  say? The total cross section for the associated production of a pair of  $150 \text{ GeV}/c^2$  top quarks in the model used above is about  $20 \times 10^{-36} \text{ cm}^2$ . The signatures for such events are likely to be distinctive. We conclude that an integrated luminosity greater than  $10^{36} \text{ cm}^{-2}$  is required for their detection, unless the cross section is larger than that given by the particular model used.

$$\sigma (tt) = 20\text{pb}$$

設計値  $1\text{pb}^{-1}$

# 日本グループの物理解析準備

*Version 1.10*

## Reviews and Simulations for CDF '86 - '87 Run

### Contents

- Minimum Bias Events and Background
- QCD Jets
- Electron and Missing Transverse Energy in QCD Jets
- W, Z Bosons
- Top Quark
- Centauro Search at CDF
- Gluino and Squark Events with Missing ET Trigger
- Triggers for CDF '86-'87 Run



This report is intended to provide materials for the CDF physics run scheduled for winter 1986 to spring 1987. During this period Tevatron is expected to deliver the total integrated luminosity of  $100\text{nb}^{-1}$  with c.m. energy of 1800 GeV. The report includes reviews of CERN results on various physics subjects, their trigger conditions, experience from the 1985 CDF engineering run, suggestions of cosmic ray experiments and simulation studies on processes to be, or predicted to be, observed at CDF in the 1986-1987 run. The booklet is planned to be handy and practical. At present this is very preliminary, and this will be kept updated and upgraded during the course of CDF experiment.

January 10, 1987

F.Abe\*, Y.Funayama\*\*, Y.Hayashide, T.Kamon, S.Kim, K.Kondo, T.Mimashi  
S.Ogawa, T.Ozaki, T.Suzaki, S.Takahashi, K.Takikawa  
M.Takano, H.Tsuda and F.Ukegawa

University of Tsukuba

\* KEK

\*\* Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo

## Revision History

27 Sep 1986	V1.00	-Original creation of "Reviews and Simulations" Minimum Bias events, QCD Jets, W/Z, Top Quark, Centauro, and SUSY
2 Oct 1986	V1.01	-Correct typological errors in V1.00.
15 Oct 1986	V1.02	-Add a chapter "Triggers for CDF '86-'87 run". -Add results of a simulation study on the background (bbX) for top-quark search in Chapter "Top Quark".
26 Oct 1986	V1.03	-Correct typological errors in V1.02. -Add results of the fall 1985 run in Chapter "Minimum Bias Events and ... "
10 Jan 1987	V1.10	-2nd Edition. -Change titles: "Minimum Bias Events and Background for Minimum Bias Trigger" ---> "Minimum Bias Events and Background" "Trigger in Jets" ---> "QCD Jets" "Transverse Momentum of Electron and Missing Transverse Energy in QCD Jets" ---> "Electron and Missing Transverse Energy in QCD Jets" -Reedit "Minimum Bias Events and Background". -Exchange figures in Section 3 of Chapter "Top Quark" for resultant figures obtained from analysis with higher statistics. -Add results on testing trigger algorithms with Monte Carlo simulation for Chapters "QCD Jets" and "W,Z Bosons".

# TOP QUARK

## 1 INTRODUCTION

A total of 12 candidates of top-quarks were reported by the UA1 at the SPS Collider during runs in 1982-1983 and 1984 [1]. These candidates, however, could be suspected as  $bb$  jets of QCD backgrounds [2]. Therefore, the top-quark search is still one of the interesting and important topics in the CDF experiment.

This report is intended to review the top-quark search by the UA1 and to estimate the number of triggers for the top-quark signature by the CDF at an integrated luminosity of  $100 \text{ nb}^{-1}$ . Also is studied the fakeness of  $bbX$

events for the top-quark search with Mon Carlo simulation.

## 2 TOP-QUARK SEARCH BY THE UA1

The top-quark search was made by the UA1 Collaboration via  $W \rightarrow t+b \rightarrow l+v+b+b$  decay channel. Table 1 presents a summary of the trigger conditions and the number of candidates for the top-quark signature at the UA1 during 1982-1983 and 1984 runs. A total of 9 candidates of  $W \rightarrow t+b \rightarrow e+v+b+b$  decay and 3 candidates of  $W \rightarrow t+b \rightarrow \mu+v+b+b$  decay were found as tabulated in Table 1 [3, 4].

The ratio of production cross-sections of  $W$  boson  $\sigma_W(\sqrt{s} = 1.8 \text{ TeV})/\sigma_W(\sqrt{s} = 0.63 \text{ TeV})$

TOP001		
Table 1 Run Summary of the UA1 Experiment		
	1982-1983 Run [3]	1984 Run [4]
Trigger Condition	jet : $E_T > 15 \text{ GeV}$	jet $E_T > 15 \text{ GeV}$ (a) e $E_T > 10 \text{ GeV}$ (b) $\mu$ : muon chamber (c) Total: $\Sigma E_T > 40 \text{ GeV}$
Integrated Luminosity	$136 \text{ nb}^{-1}$ at $\sqrt{s} = 546 \text{ GeV}$	$263 \text{ nb}^{-1}$ at $\sqrt{s} = 630 \text{ GeV}$
Threshold in the Analysis	$E_T(\text{electron}) > 15 \text{ GeV}$ $E_T(\text{muon}) > 23 \text{ GeV}$ $E_T(\text{jet1}) > 8 \text{ GeV}$ $E_T(\text{jet2}) > 7 \text{ GeV}$	
The number of top candidate		
(1) Total	6	6
(2) $\mu\nu bb$	3	
(3) $e\nu bb$	3	6

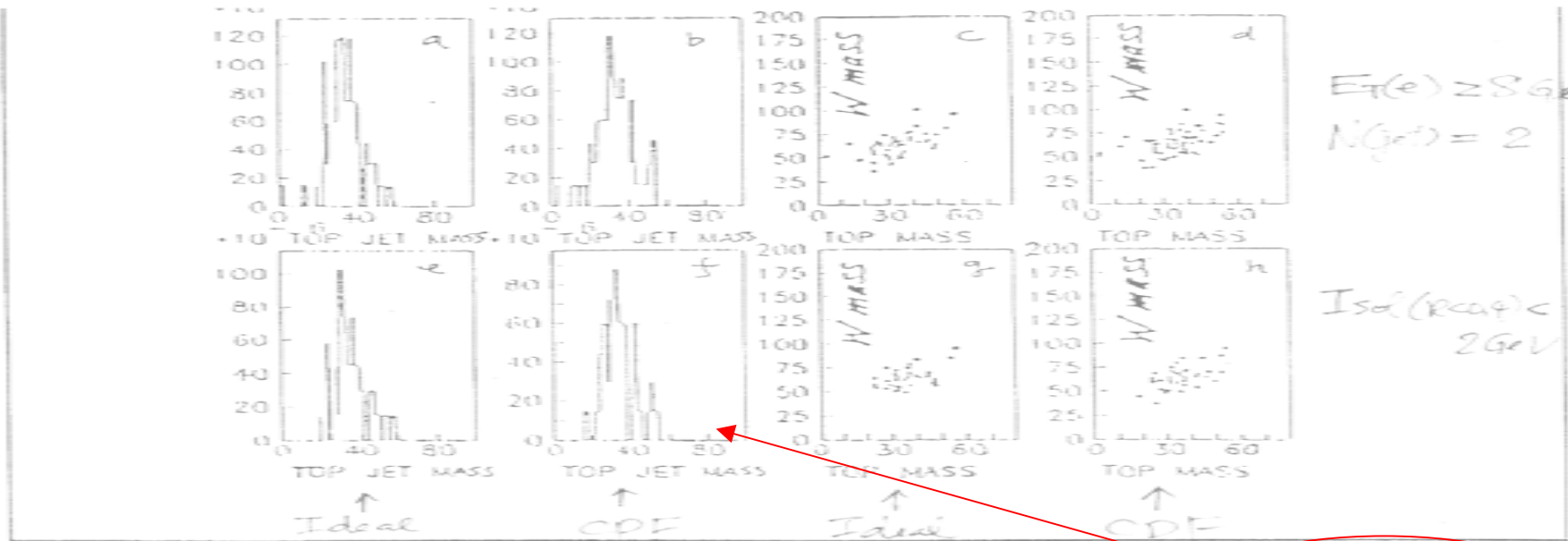


Figure 11 Same as Fig. 10 for top-quark signal sample with ODORICO.

$W \rightarrow tb$   
 $\hookrightarrow b \ell \nu$

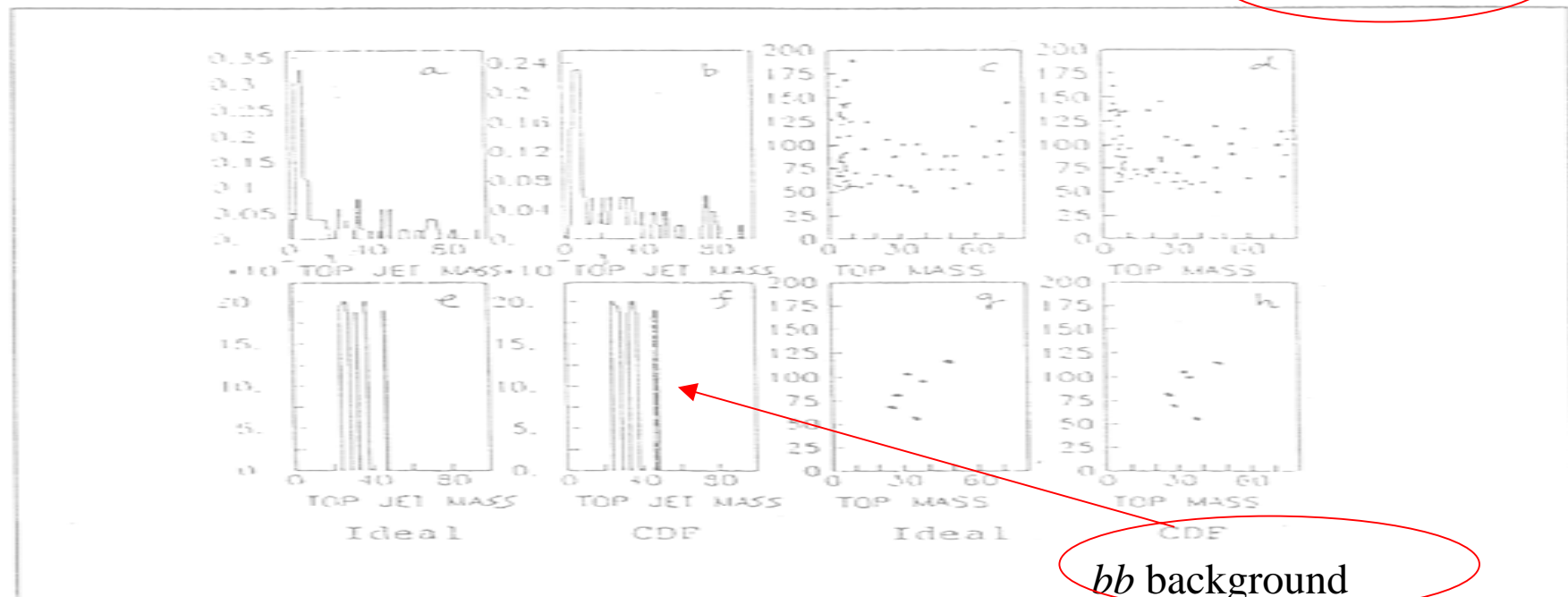


Figure 12 Same as Fig. 10 for  $bbX$  background sample with ODORICO.

$bb$  background

#### 4 SUMMARY

The study of  $W \rightarrow t+b \rightarrow l+v+b+b$  decay by the UA1 was reviewed at the CERN SPS Collider energies. A total of 9 candidates of the decay remained after the UA1 analysis filter. Such events, however, were suspected as  $bbX$  background.

The similar study was made for the CDF with the following four kinds of Monte Carlo samples:

- (1)  $W \rightarrow t+b$  with ISAJET at  $\sqrt{s} = 2 \text{ TeV}$ ,
- (2)  $W \rightarrow t+b$  with ODORICO at  $\sqrt{s} = 2 \text{ TeV}$ ,
- (3)  $bbX$  background with ODORICO at  $\sqrt{s} = 2 \text{ TeV}$ ,
- (4)  $W \rightarrow t+b$  with ISAJET at  $\sqrt{s} = 540 \text{ GeV}$ .

The results of the study are summarized as follows.

(1) The efficiency for signal events was higher with ISAJET than with ODORICO. This is due to the fact that the jet multiplicity associated with  $W \rightarrow t+b$  decay is higher with ODORICO than with ISAJET.

(2) The  $bbX$  events passing selection cuts apparently faked the mass peak around  $40 \text{ GeV}/c^2$ .

(3) The fraction of the correct combination for  $b_1$ - and  $b_2$ - quark jets was 54 % at  $\sqrt{s} = 2 \text{ TeV}$  and 76 % at  $\sqrt{s} = 540 \text{ GeV}$ . This is due to an existence of more hard recoil jets at the Tevatron energy than the SPS energy.

#### REFERENCES

- [1] M.N.Minard, Proceedings of the International Symposium on Physics of Proton-Antiproton Collision, Tsukuba, March 1985, p409~p430.
- [2] R.Odorico, Th.3678-CERN, August 1983.
- [3] C.Rubbia, CERN-EP/84-55 (1984).
- [4] S.Geer, CERN-EP/85-163 (1985).
- [5] E.Eichten, Fermilab-Conf-85/178-T, May 1986.
- [6] V.Barger, H.Baer, K.Hagiwara, A.D.Martin

*bb*バックグラウンドが  
40GeV/c<sup>2</sup>付近のピーク  
を作る。

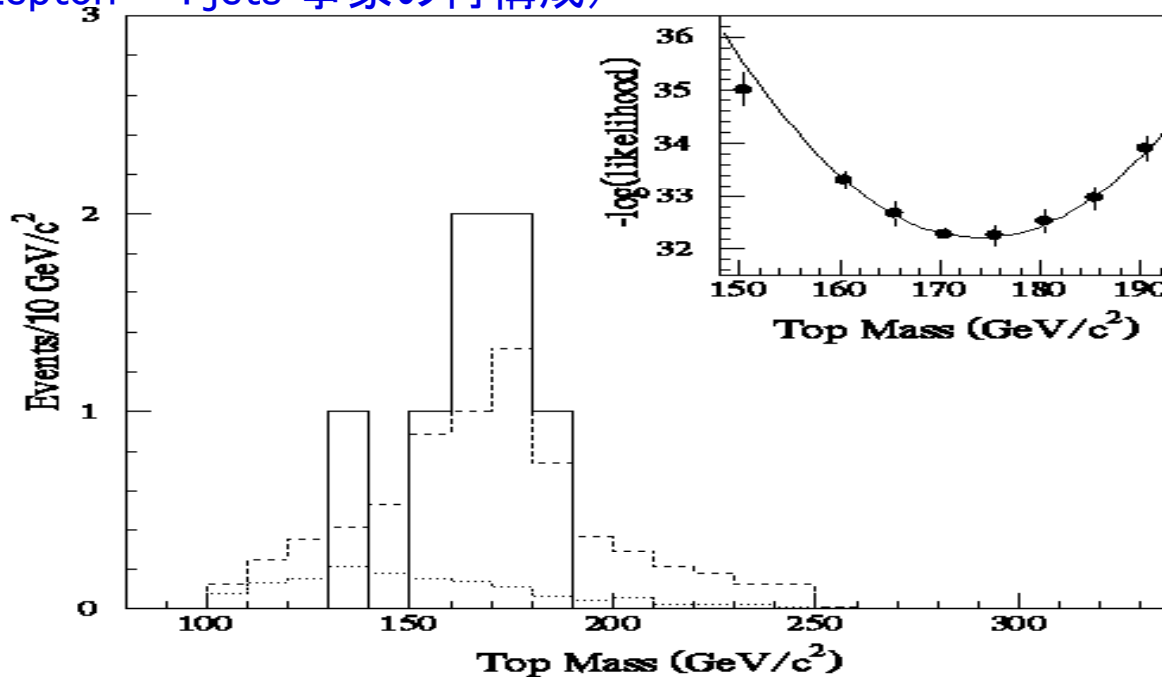
# トップクォーク生成の証拠

Run 1A (1992-93, 19 pb<sup>-1</sup>) の結果 PRL('94); PRD('94)

観測事象数	bkgd 期待値	統計的有意性
Dilepton 2 events	0.56 +0.25/-0.13	12.0%
SVX 6 tags	2.3 ± 0.3	3.2%
SLT 7 tags	3.1 ± 0.3	4.1%

三つを総合した統計的有意性:  $P = 0.26\%$  ( $2.8\sigma$ )

質量分布 (Lepton + 4 jets 事象の再構成)



$$M_{\text{top}} = 174 \pm 10 \text{ (統計)} +13/-12 \text{ (系統)} \text{ GeV}/c^2$$

$$\sigma(t\bar{t}) = 13.9 +6.1/-4.8 \text{ pb}$$

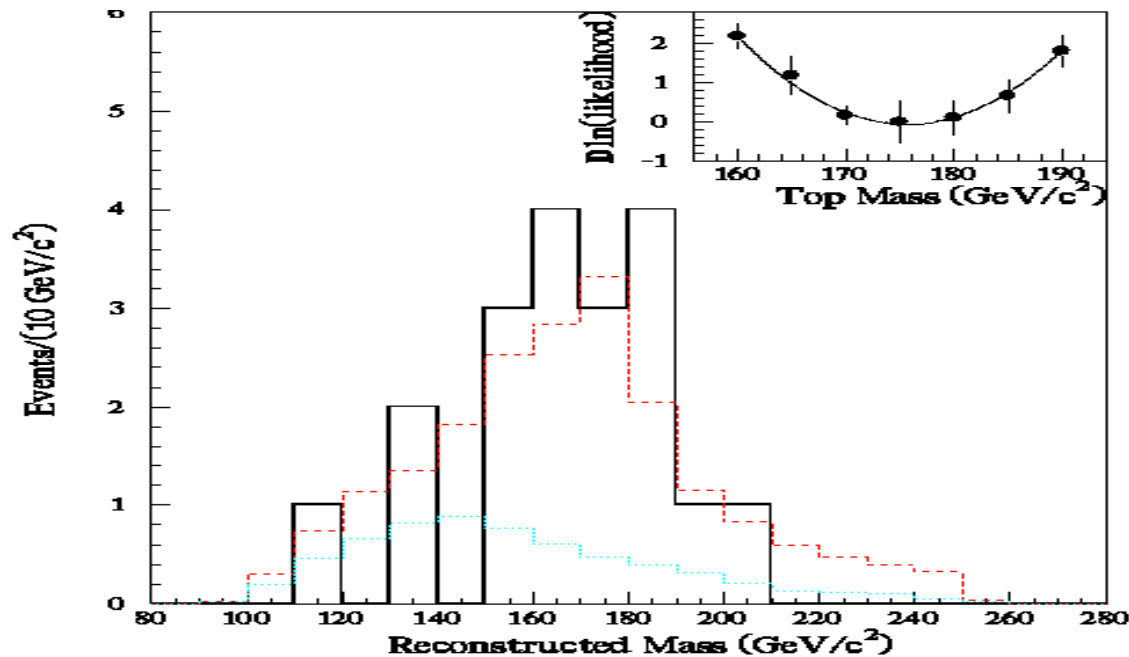
# トップクォーク生成の確認

Run 1A +1B ; 67 pb<sup>-1</sup> の結果 PRL('95)

	観測事象数	bkgd 期待値	統計的有意性
Dilepton	6 events	1.3 ± 0.3	3x10 <sup>-3</sup> (2.7σ)
SVX	27 tags	6.7 ± 2.1	2x10 <sup>-5</sup> (4.0σ)
SLT	23 tags	15.4 ± 2.0	6x10 <sup>-2</sup> (1.9σ)

三つを総合した統計的有意性:  $P = 1 \times 10^{-6} (4.8\sigma)$

質量分布 (Lepton + 4 jets 事象の再構成)



$$M_{\text{top}} = 176 \pm 8 \text{ (統計)} \pm 10 \text{ (系統)} \text{ GeV}/c^2$$

$$\sigma(t\bar{t}) = 6.8 + 3.6 / -2.4 \text{ pb}$$

# Run 1: 110 pb<sup>-1</sup>全データの解析結果

## ダイレプトン・チャンネル

10 事象 ( eμ: 7, μμ: 2, ee: 1 )

バックグラウンドの推定: 2.1 ± 0.4 事象

## レプトン+>3ジェット・チャンネル

(SVX を用いたb-tagging)

34 事象

バックグラウンドの推定: 8.0 ± 1.4 事象

内訳:	Mistags	2.0 ± 0.4	Zbb, Zcc	0.3 ± 0.1
	Wbb, Wcc	2.7 ± 0.7	Z → ττ, WW, WZ	0.3 ± 0.1
	Wc	0.8 ± 0.3	Non-W( bb を含む)	1.9 ± 0.7

(SLT を用いたb-tagging)

40 事象

バックグラウンドの推定: 24.3 ± 3.5 事象

(SVX, SLT を用いて2ジェットのb-tagging)

9 事象

バックグラウンドの推定: 0.4 ± 0.1 事象

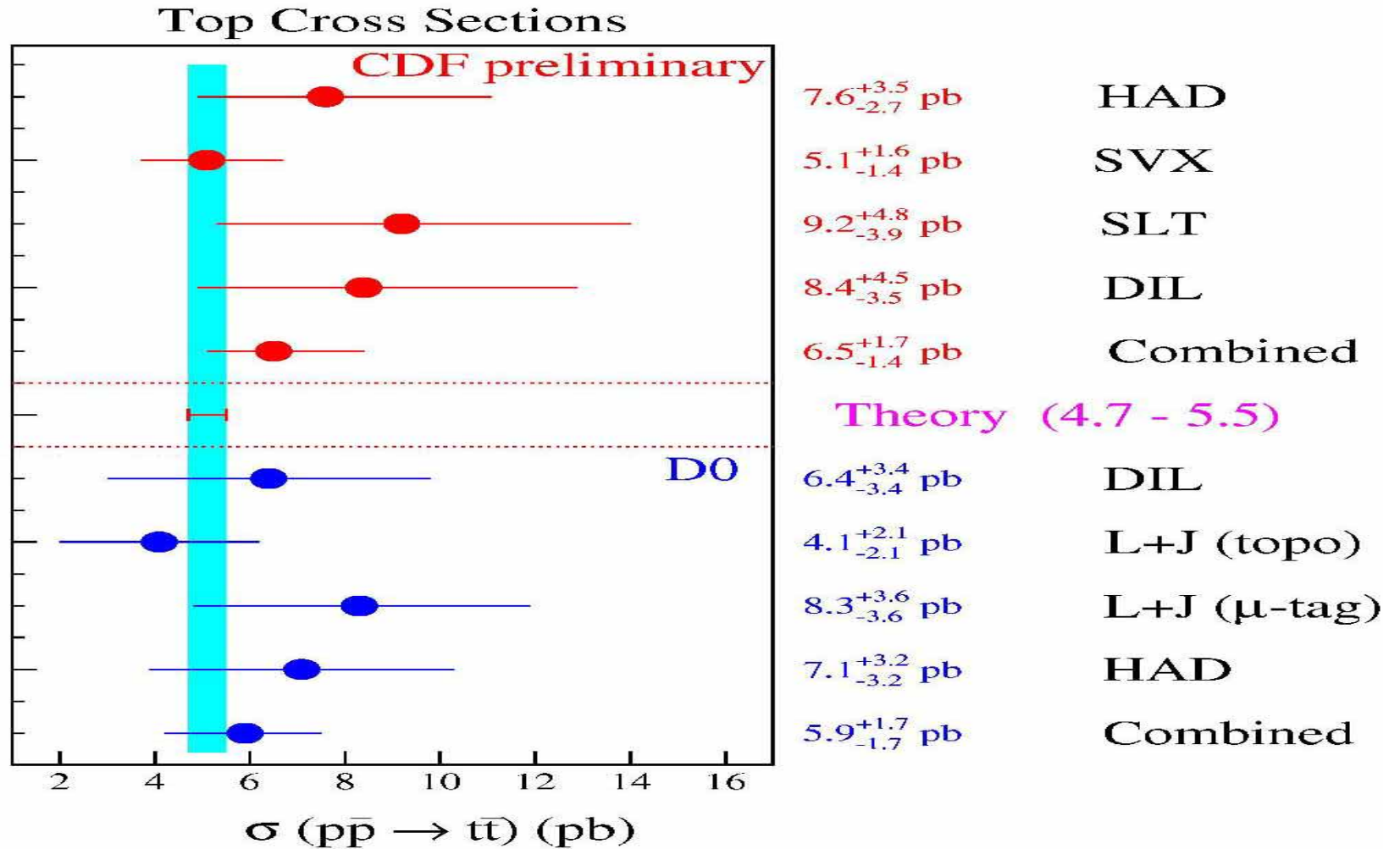
## マルチジェット ( All Hadronic )・チャンネル

192 事象

バックグラウンドの推定: 148 ± 10 事象

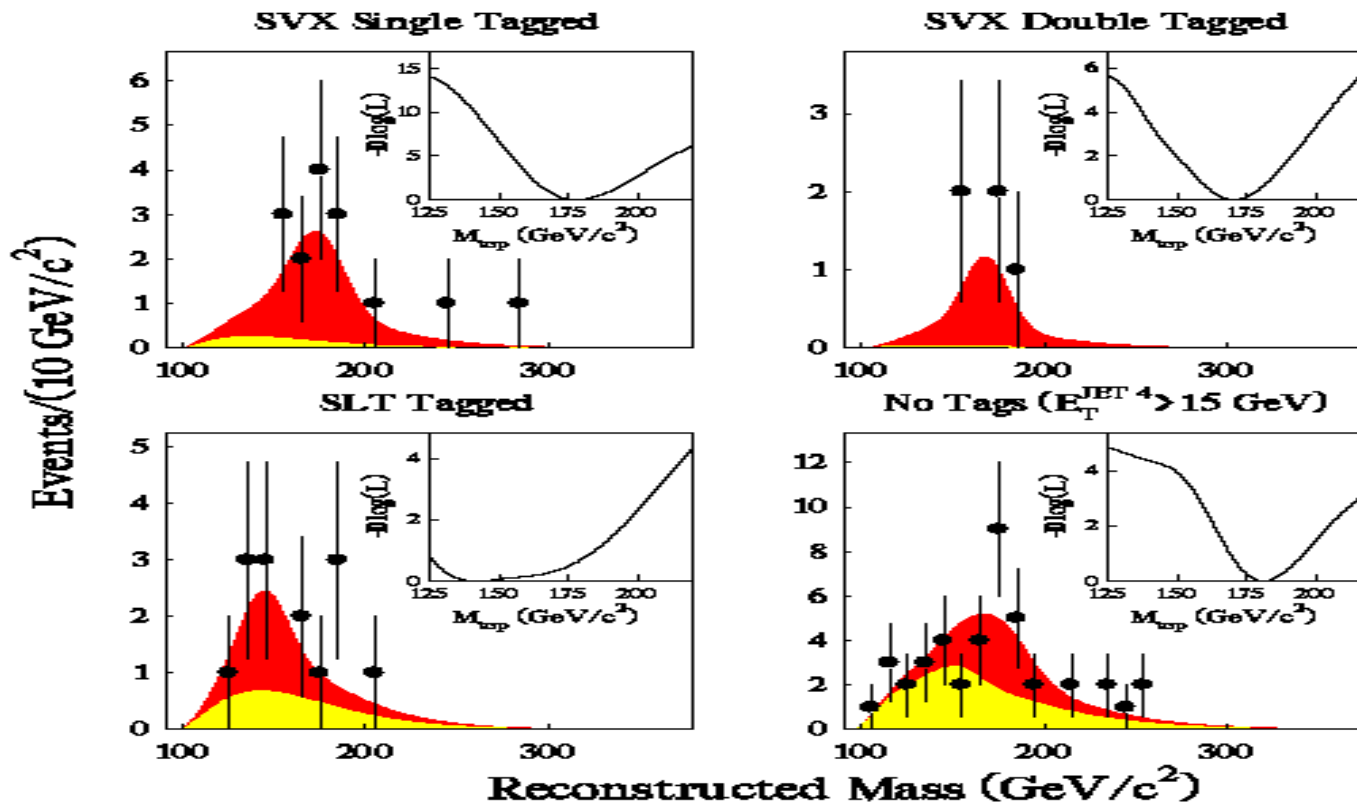


# トップクォーク生成断面積



$\sigma(tt)$  by CDF =  $6.5^{+1.7}_{-1.4}$  pb

# 4つの異なるb tag サブサンプルのトップクォーク質量分布



bkgd(主に W + jets 直接生成)は推定値に constrain して、質量分布を(質量  $M_{top}$  の信号)+ (bkgd) にフィットして  $M_{top}$  を決める。

サブサンプル	観測事象数	bkgdの割合(%)	$M_{top}$ (GeV/c <sup>2</sup> )
SVX b-tag 2個	5	5 ± 3	170.1 ± 9.3
SVX b-tag 1個	15	13 ± 5	178.0 ± 7.9
SLT b-tag 1個	14	40 ± 9	142 +33/-14
b-tag 0個 ( $E_T(jet4) > 15$ GeV)	42	56 ± 15	181.0 ± 9.0

## トップクォークの質量の系統誤差

	GeV/c <sup>2</sup>	%
ジェットのエネルギー・スケール	4.4	2.5
グルオン放射による効果	1.8	1.0
バックグラウンドの分布	1.3	0.7
b-タグによるバイアス	0.4	0.2
パートン分布関数	0.3	0.2

全体で4.9GeV/c<sup>2</sup> ( 2.8% )ジェットのエネルギー・スケールの不確定性からくる寄与が4.4GeV/c<sup>2</sup> ( 2.5% )と支配的である。

この不確定性の精度はレプトン+ ≥ 4ジェット事象の中の2ジェットの不変質量分布が示すWボソンのピークによっても確かめられる。

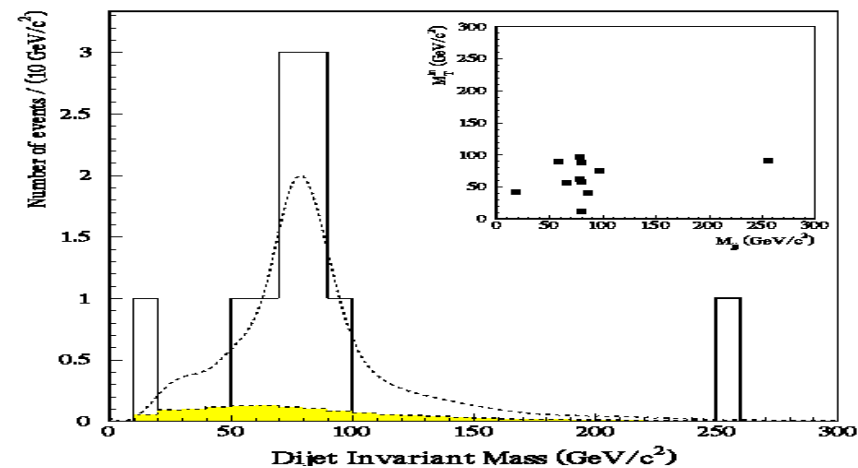
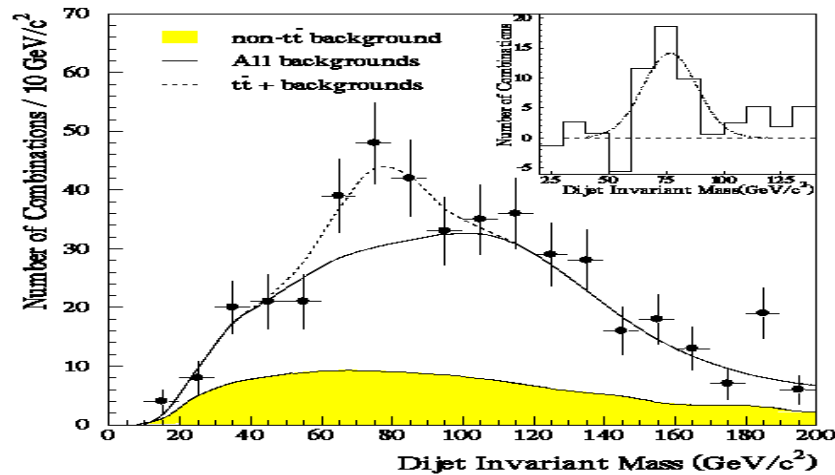
# Wボソンのハドロン崩壊の観測 PRL('98)

レプトン+ ≥ 4ジェット事象の中の2ジェットの不変質量分布:

(1) b tag する前の153 事象のうち $H > 310 \text{ GeV}$ を満たす81 事象。

ここで、 $H = E_T(\text{lepton}) + \sum E_T(\text{jet}) + \text{missing } E_T$

(2) 2つのジェットがb tag された10 事象。



2つのサンプルの解析結果を合わせると、

● W→2 jetsの信号の統計的有意性は

$3.3\sigma$  ( Prob= $5.4 \times 10^{-4}$  )

●  $M_W = 77.2 \pm 3.5(\text{stat}) \pm 2.9(\text{syst}) \text{ GeV}/c^2$

これによって、レプトン+4ジェットのトップ候補事象の中に2つのWボソンがあることと、ジェットを質量再構成に用いることの正当性を示した。

# ヒッグス粒子(標準模型)の生成断面積と崩壊分岐比

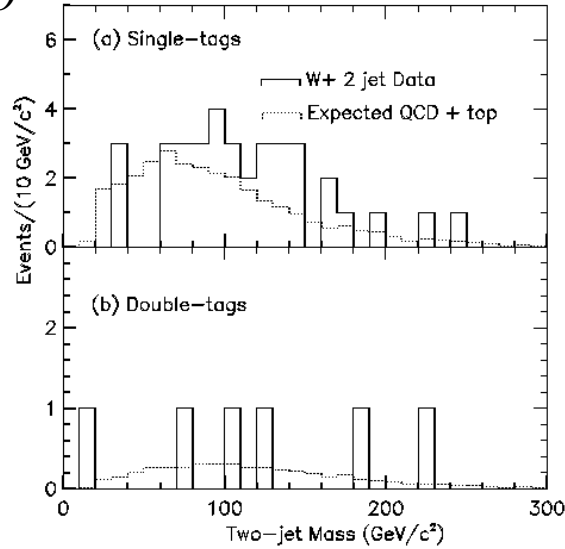
生成断面積

生成断面積 $\times$ 分岐比

# CDF Run I VH searches ( 106 pb<sup>-1</sup>)

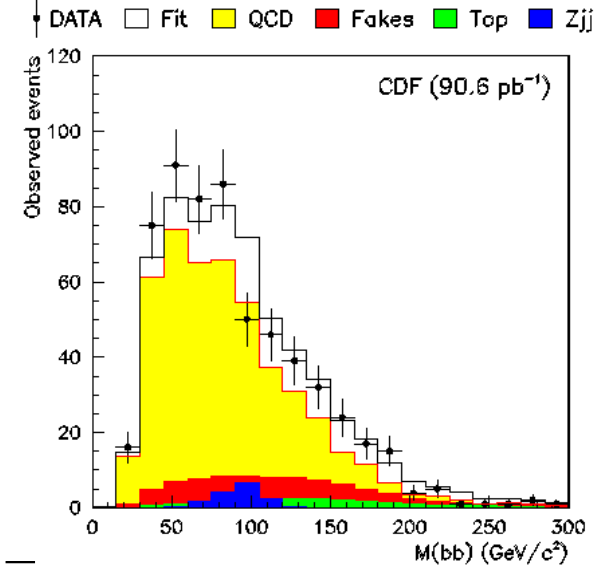
$$WH^0 \rightarrow \ell \nu + b\bar{b}$$

Expect: 30±5 st  
6.0±0.6 dt  
Observe: 36 st  
6 dt



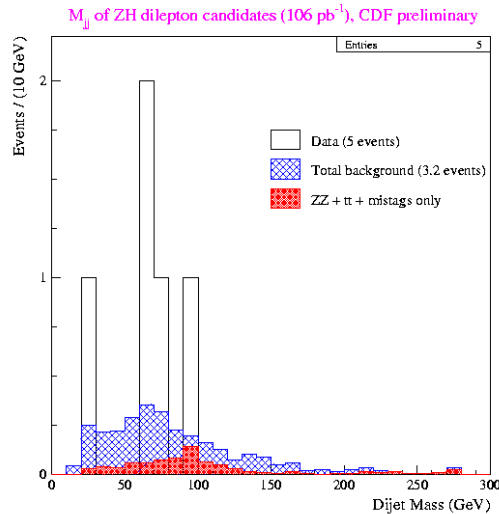
$$W/Z + H^0 \rightarrow q\bar{q}' + b\bar{b}$$

Expect:  
600 events  
Observe:  
580 events



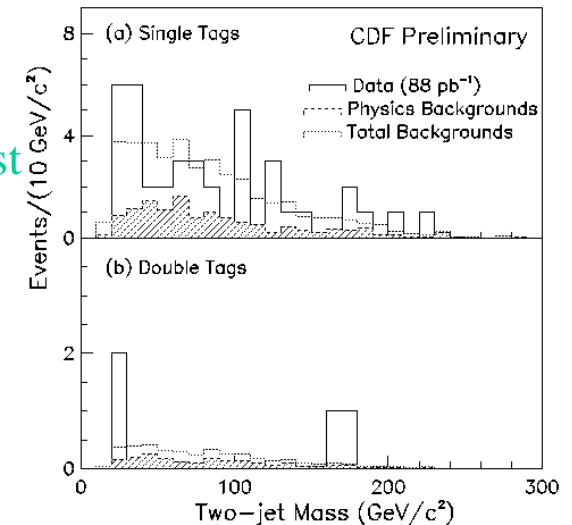
$$ZH^0 \rightarrow \ell^+ \ell^- + b\bar{b}$$

Expect: 3.2±0.7 st  
Observe: 5



$$ZH^0 \rightarrow \nu\bar{\nu} + b\bar{b}$$

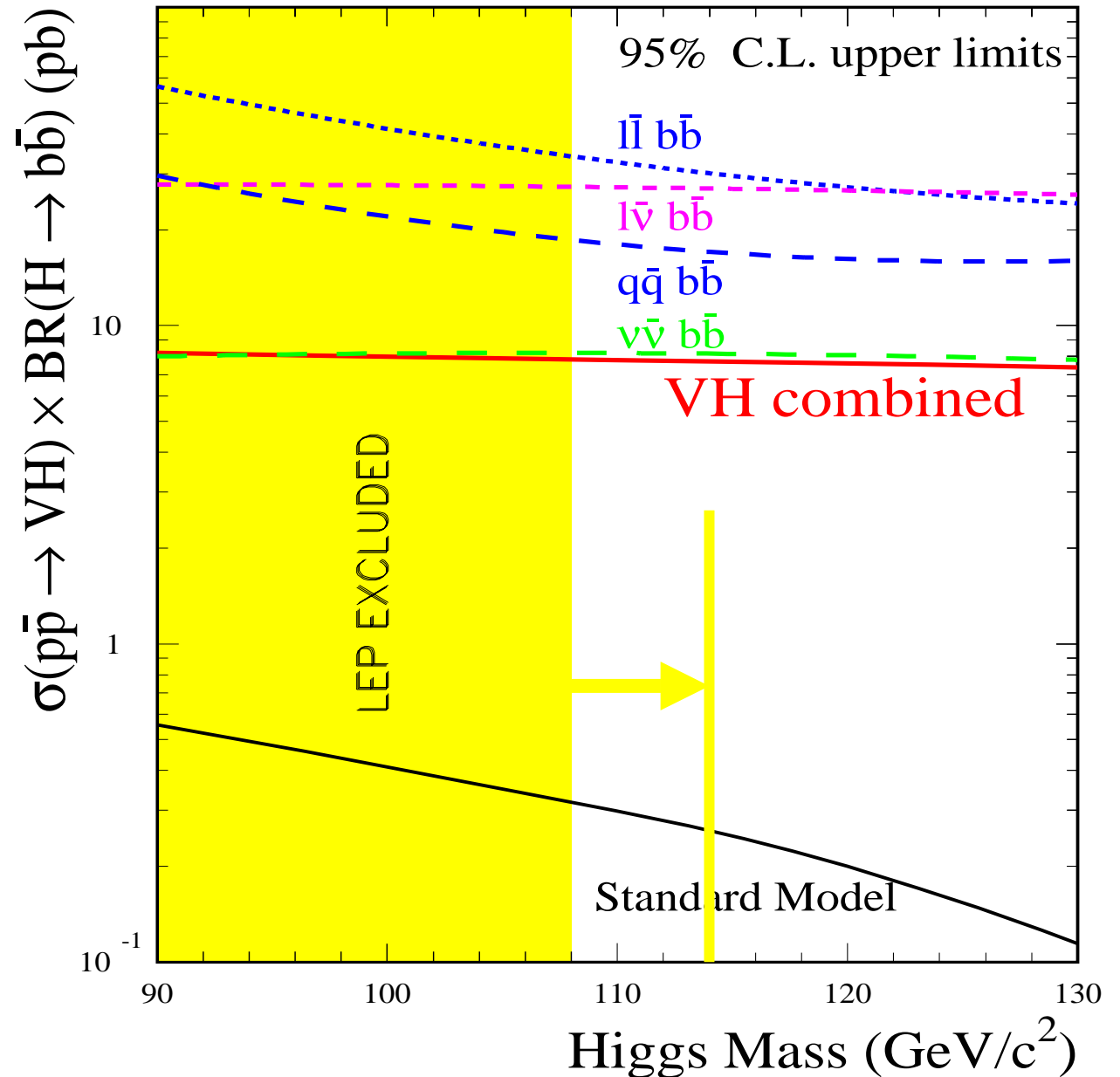
Expect: 39.2±4.4 st  
3.9±0.6 dt  
Observe: 40 st  
4 dt



# VH Production Cross Section Limit

CDF PRELIMINARY Run I

95% CL Limit is about 30 times higher than SM prediction for  $M_{\text{higgs}} = 115 \text{ GeV}/c^2$ .



## 今後のヒッグス粒子探索

- $M_H < 130 \text{ GeV}/c^2$

$$p\bar{p} \rightarrow W H X \rightarrow l \nu + b\bar{b} + X$$

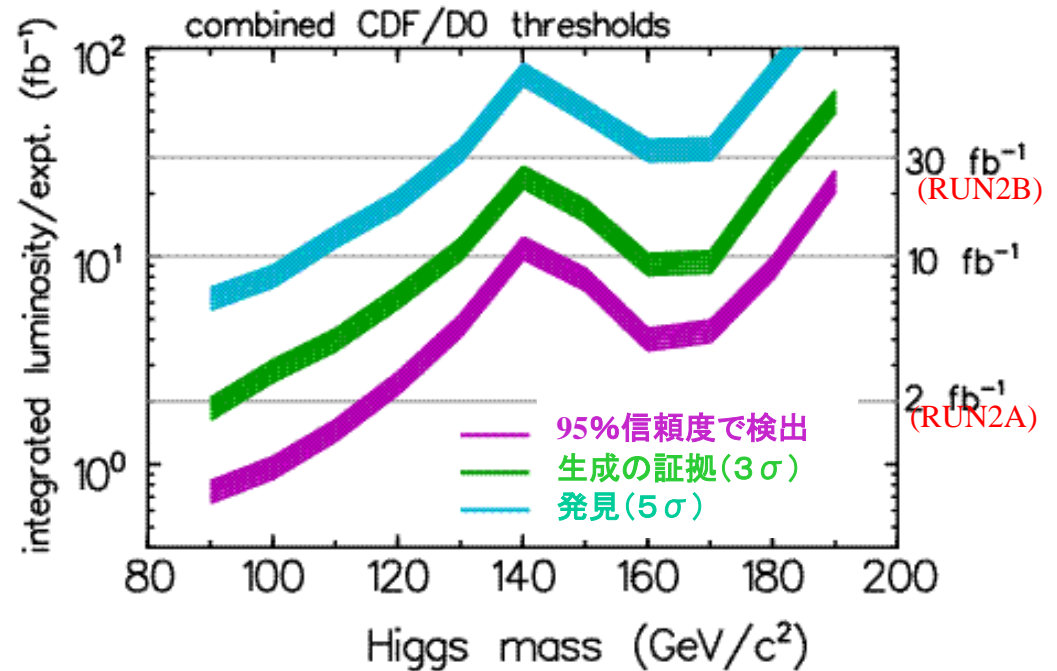
- $125 < M_H < 160 \text{ GeV}/c^2$

$$pp \rightarrow W H X \rightarrow l \nu + W^* W^* + X$$

(like-sign dilepton + jets)

- $150 \text{ GeV}/c^2 < M_H$

$$p\bar{p} \rightarrow H X \rightarrow W W X \rightarrow l \nu l \nu X$$



RUN2 (~2009)

95%信頼度で  $M_H < 180 \text{ GeV}/c^2$  検出可能

$M_H < 130 \text{ GeV}/c^2$  の証拠 ( $3\sigma$  evidence)



## まとめ

CDF実験RUN2(2001年～)で以下の成果が期待される。

- 3年間の実験で1000  $t\bar{t}$  事象が収集され、 $\Delta M_{\text{top}} \sim 3\text{GeV}/c^2$ で $M_{\text{top}}$ が測定できる。同時に $\Delta M_W \sim 30\text{MeV}/c^2$ で $M_W$ が測定できる。これらより $\Delta M_H \sim 0.3M_H$ でヒッグスの質量を間接的に測定できる。
- 今後6年間の実験で
  - 95%信頼度で  $M_H < 180\text{GeV}/c^2$ のヒッグス粒子検出可能。
  - $M_H < 130\text{GeV}/c^2$ のヒッグス粒子の生成の証拠( $3\sigma$ )。