

# 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  
筑波大学物理学系

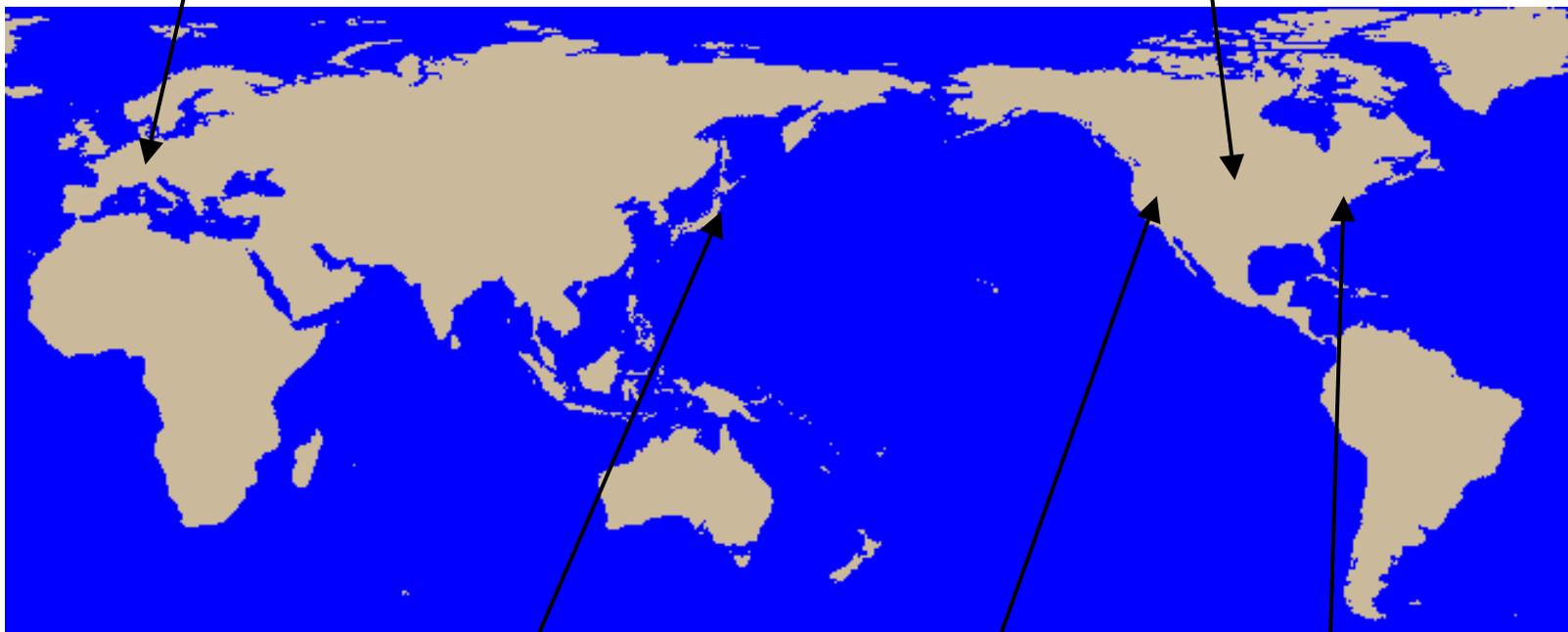
プレカレッジ講義(下館第一高等学校)  
2003年10月11, 18日

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

# 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

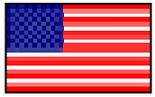
# 2TeV陽子反陽子衝突実験(CDF実験) 米国フェルミ国立加速器研究所テバトロン加速器

1992年～1996年  
Run1 (  $110\text{pb}^{-1}$  )

2001年4月～2008年  
Run2 (  $9\text{fb}^{-1}$  の予定)

# 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)

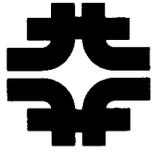
参加国：7 人数：445名 (大学・研究所：41)

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

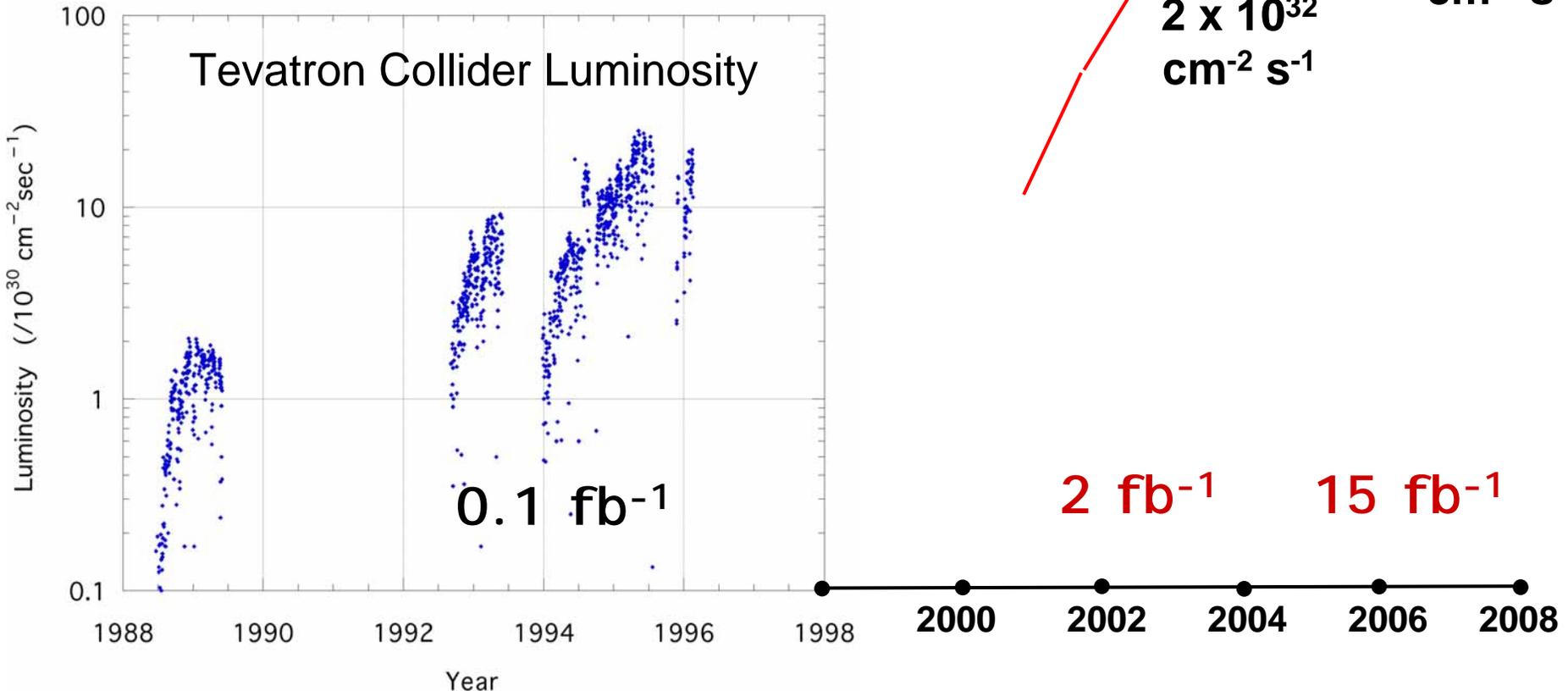
ITEP (ロシア)、Glasgow(英)、Oxford(英)、  
College of London(英)、KHEL(韓国)、岡山大学(日本)



# Tevatron History and Future

Discovery of top,  $B_c$ , ...

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



Run : 0

Ia Ib

IIa

IIb

$\sqrt{s}$  : 1.8 TeV

1.96 TeV

# Tevatron status

Collider Run IIA Peak Luminosity

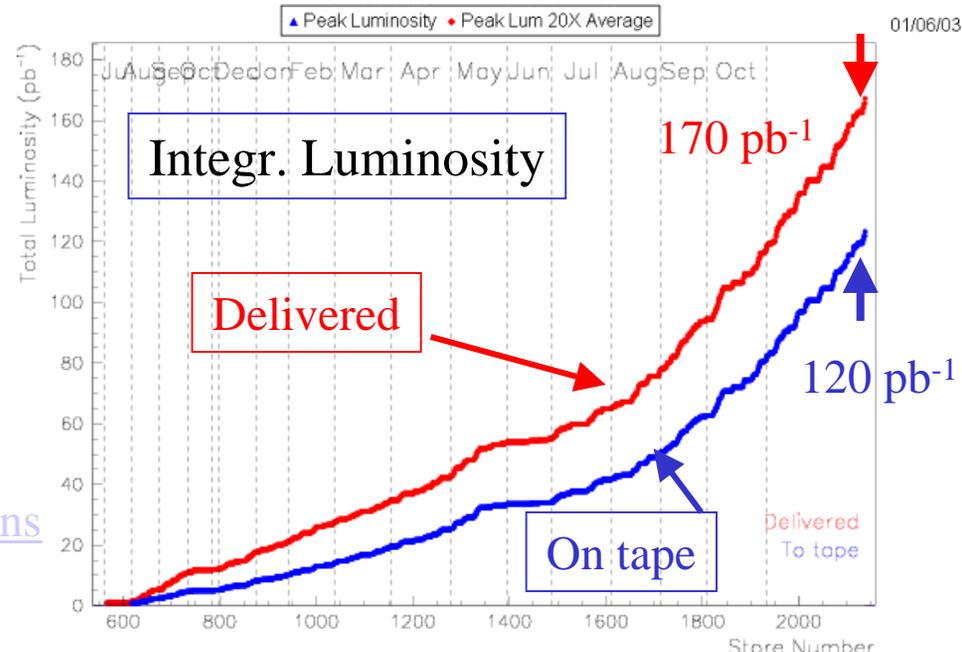
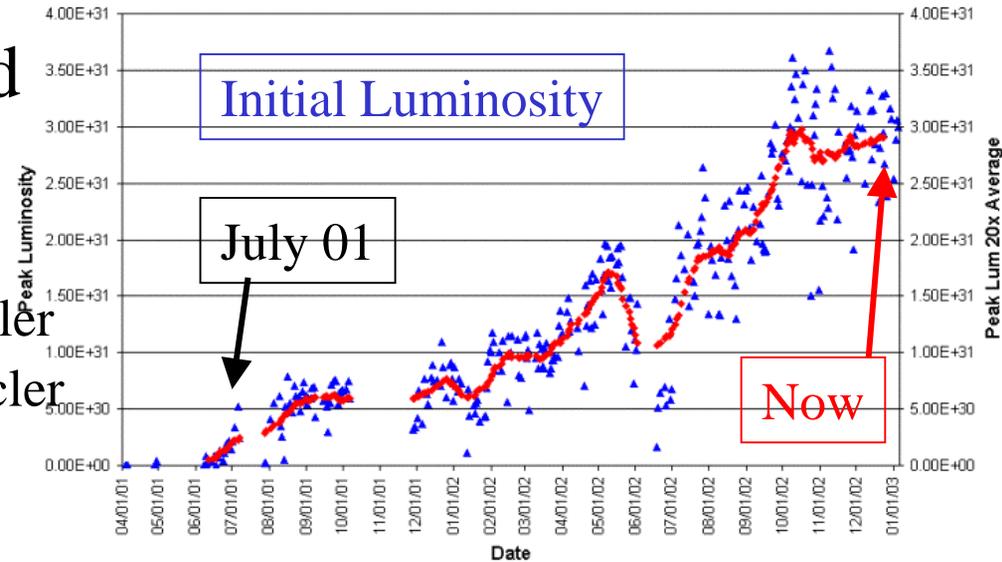
- Tevatron operations started in March 2001

## Luminosity goals for run 2a:

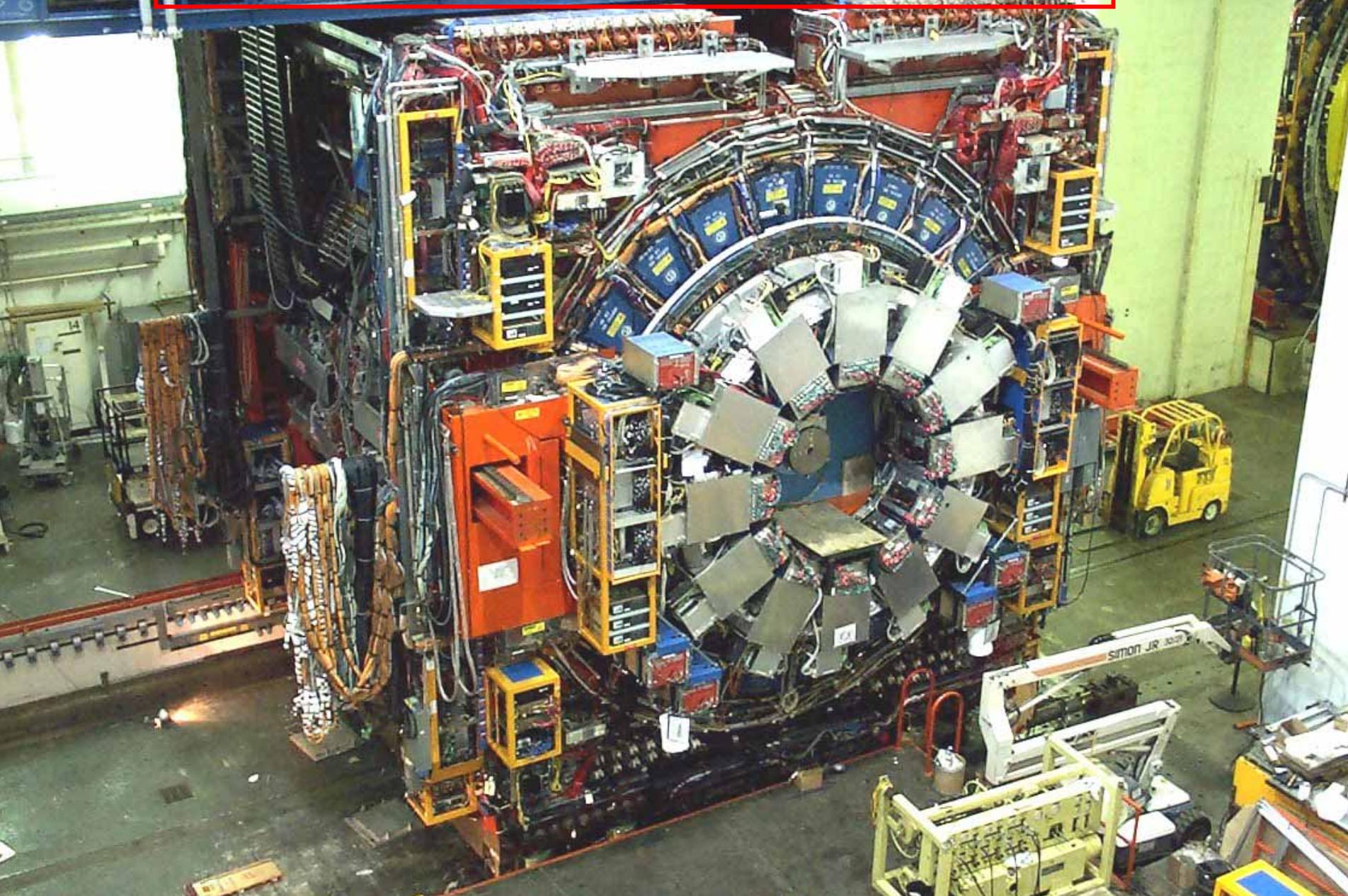
- $5-8 \times 10^{31} \text{ cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$  w/o Recycler
- $2 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$  with Recycler

## 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](#)



# CDFII Detector





New

Old

Partially  
New

Muon System

Central Calor.

Solenoid

Plug Calor.

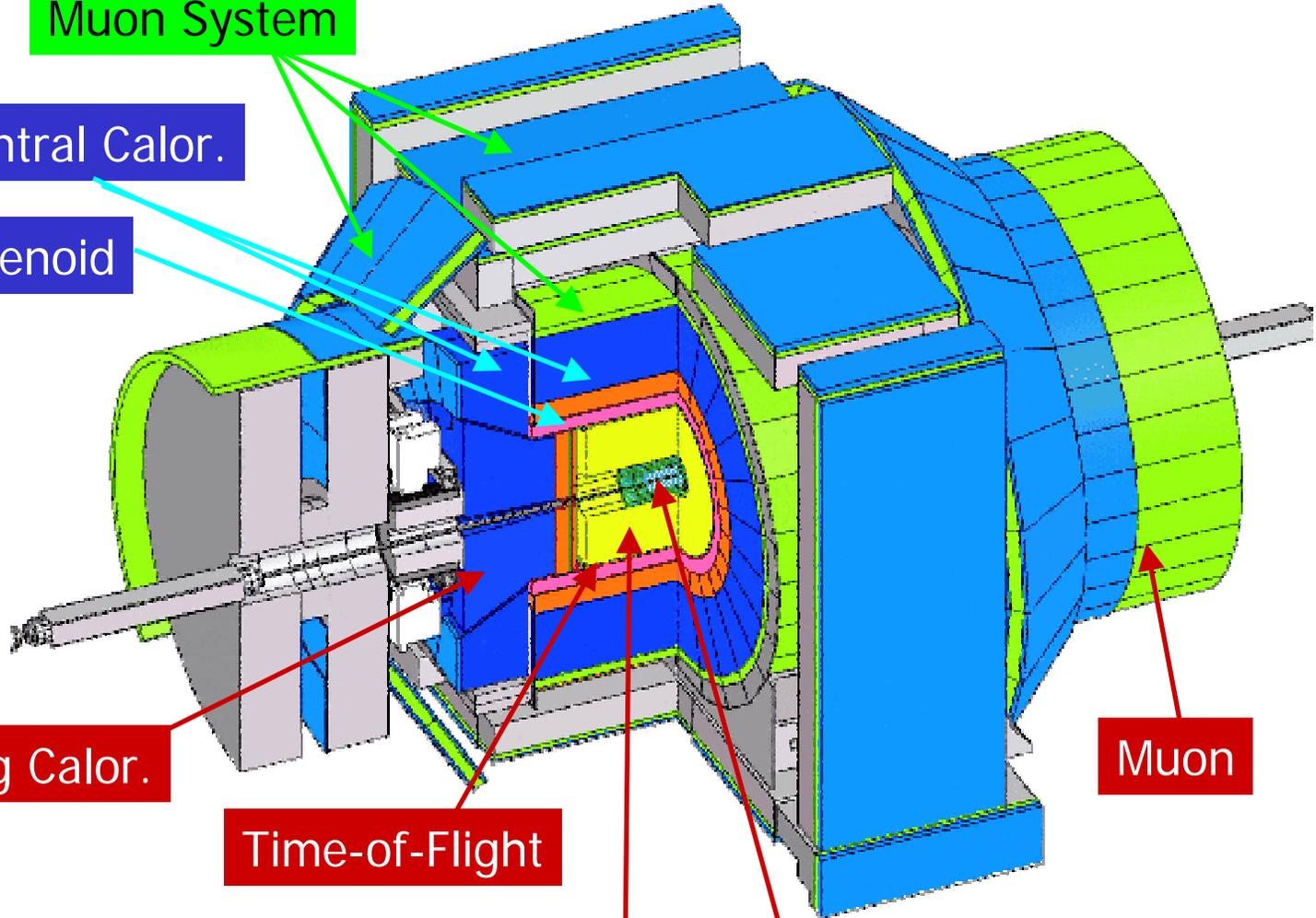
Time-of-Flight

Drift Chamber

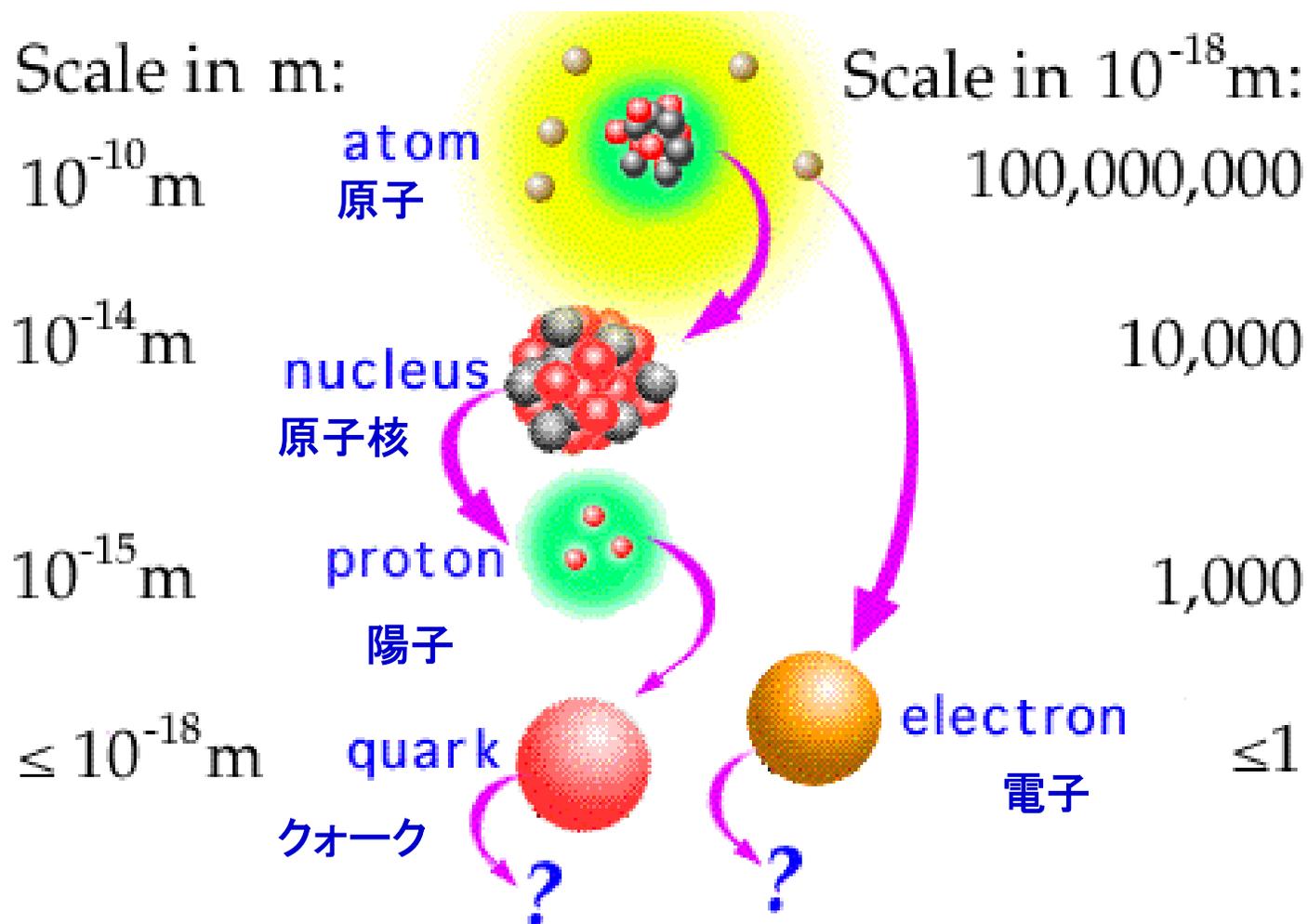
Silicon Microstrip  
Tracker

Muon

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



# 素粒子とは？



# 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)

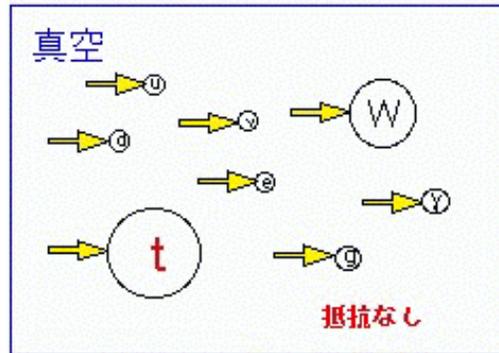
### 弱い力

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)



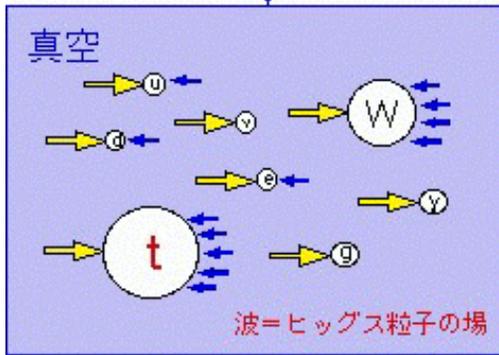
標準理論の考え方

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。

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、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

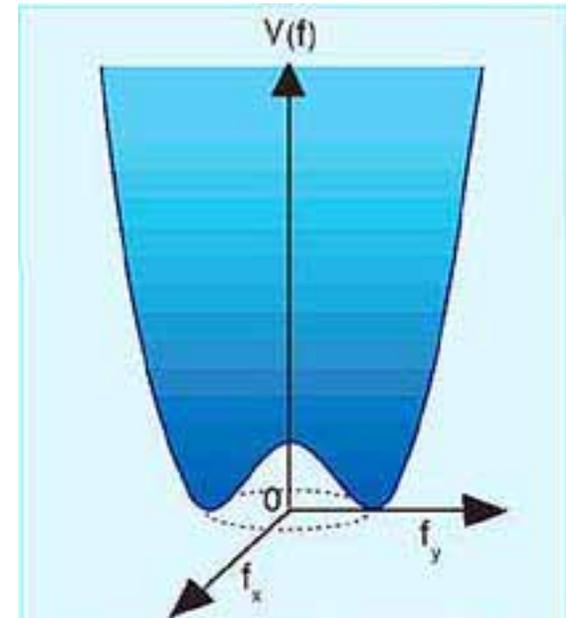
## ヒッグスポテンシャル

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

$\mu^2 > 0$  (ビッグバン直後)

真空の相転移 (対称性の破れ)

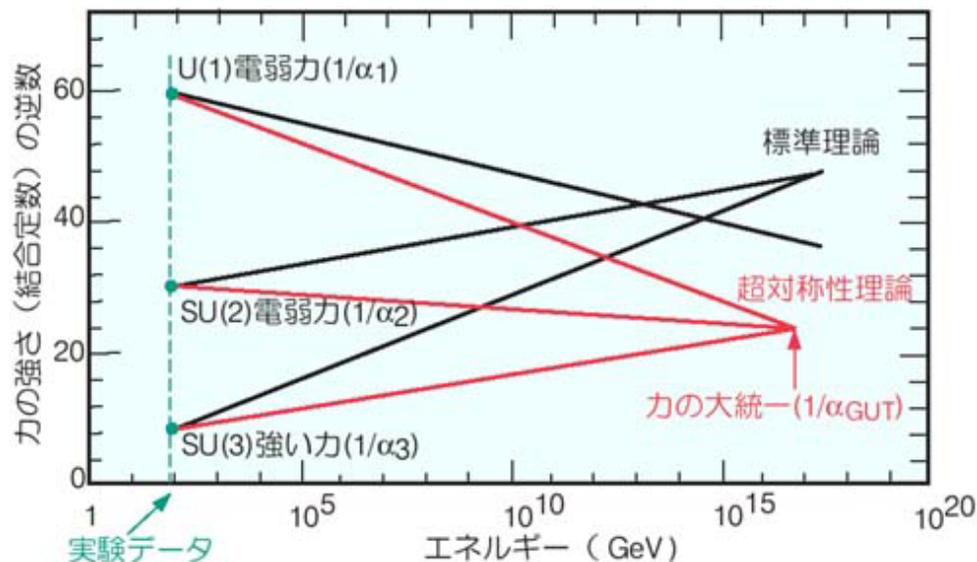
$\mu^2 < 0$  (現在)



ヒッグスポテンシャル $V(\phi)$ : ヒッグス場が点線上任意の所で最小値0を持てるため (ヒッグスボソンの凝縮)、真空の対称性が破れてしまいます。

## 大統一理論

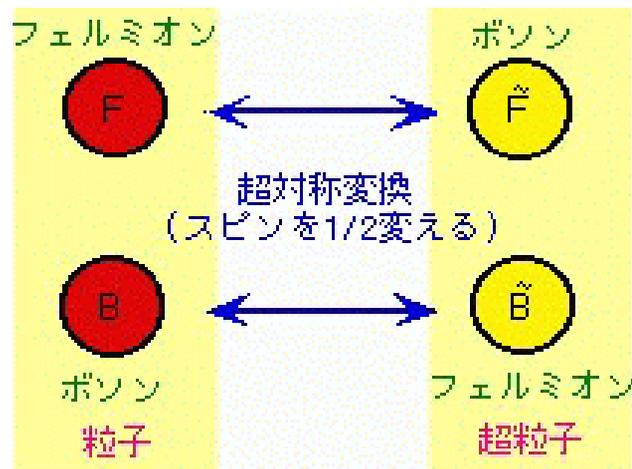
三つの力(電磁力、弱い力、強い力)は、宇宙創生直後の高温時には対称性が成り立ち、同一の力であった。それが冷えてきたときに対称性が破れて異なる力に見えるようになった。



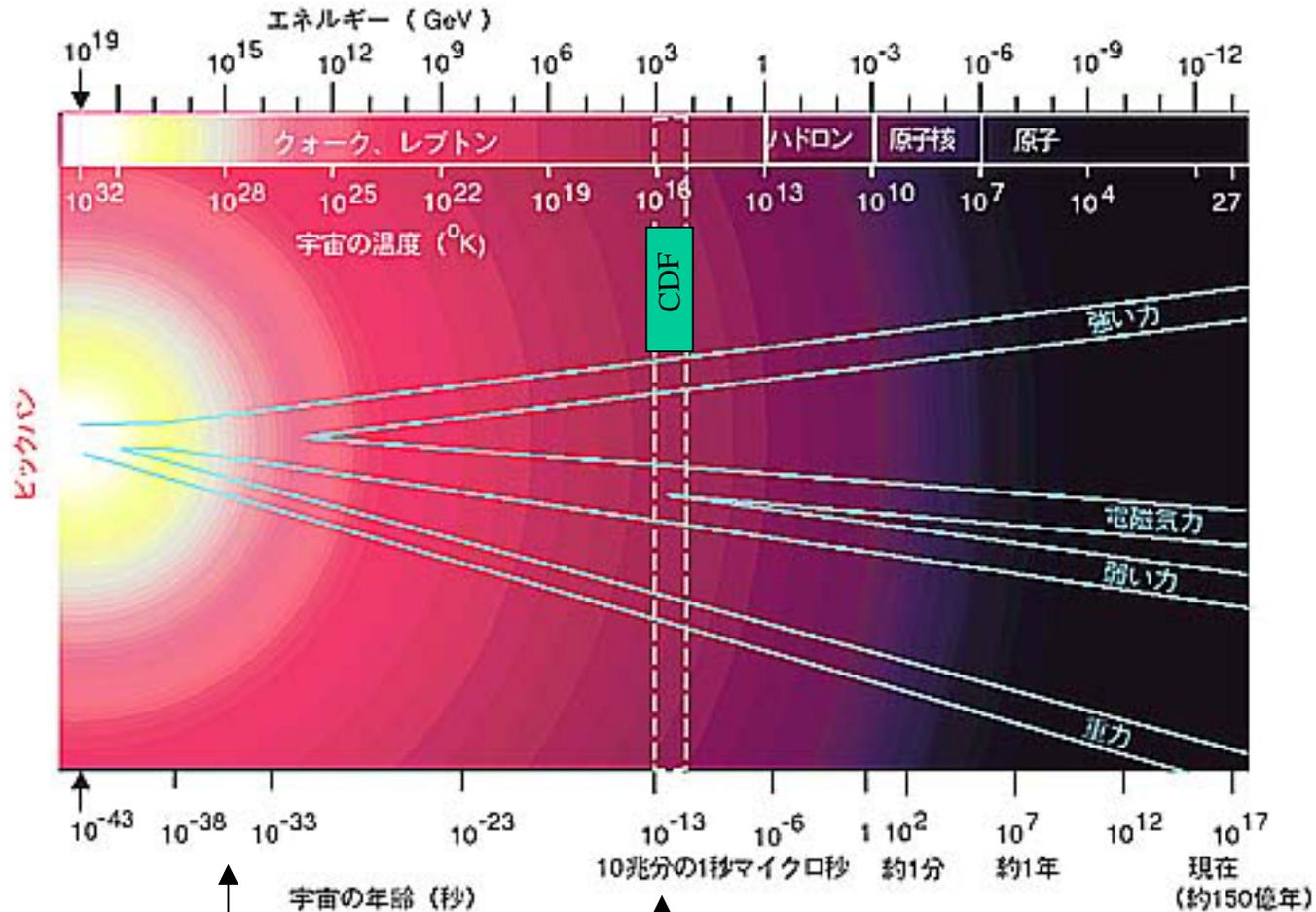
## 超対称性理論

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 $150\text{GeV}/c^2$ 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、 $\tau$ 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

# 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

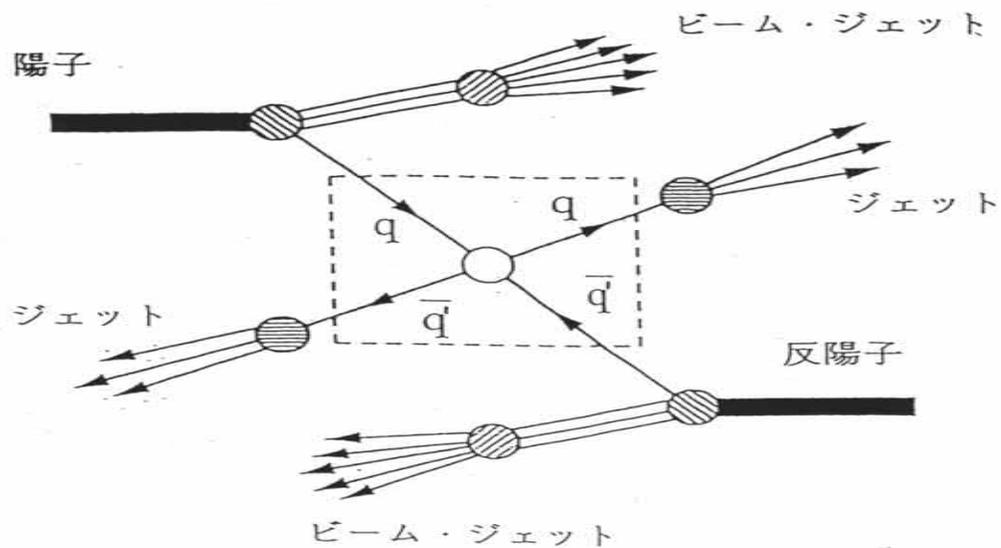
1994年 **トップクォーク発見**  
1998年 **Bc中間子発見**

2001年4月～ 物理実験(Run2)再開

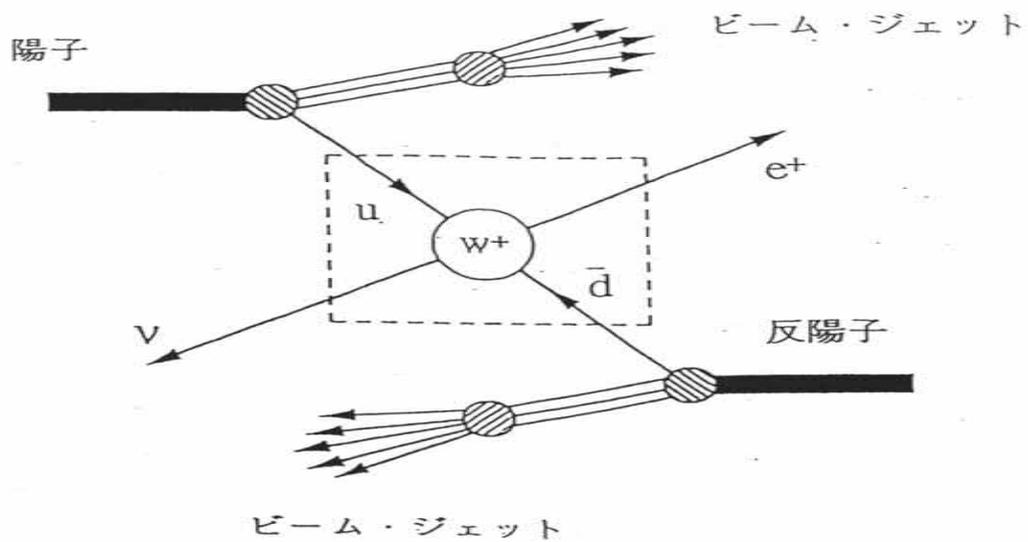
**ヒッグス粒子探索、B中間子のCP非保存、  
トップクォークの物理、電弱相互作用と強い相互作用、  
新粒子・新現象の探索。**



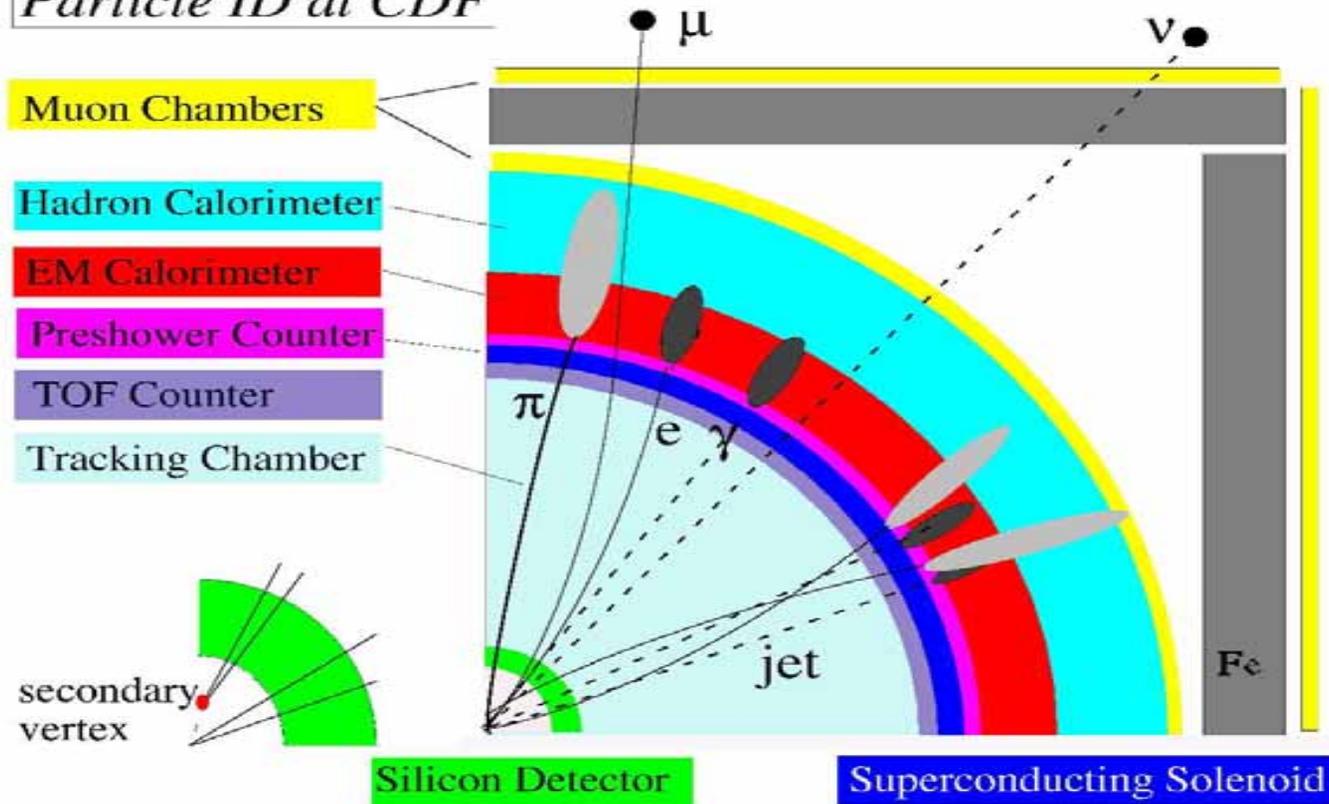
(a)



(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 )

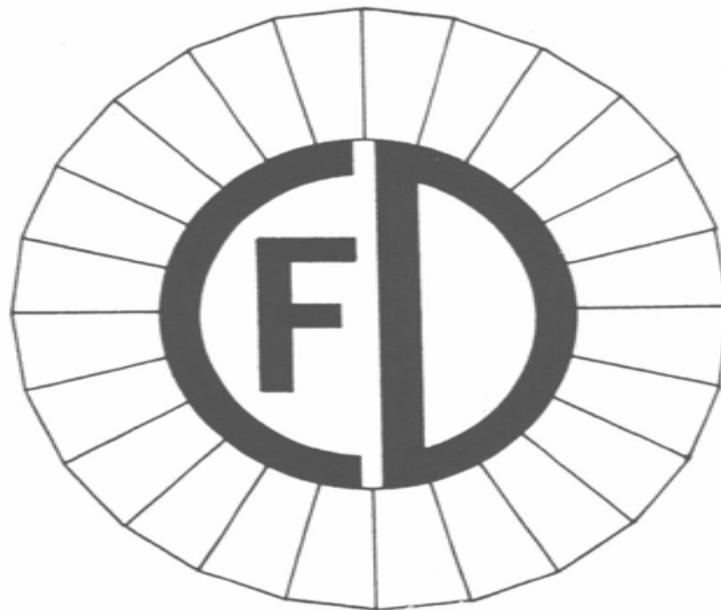
DESIGN REPORT

FOR THE

FERMILAB COLLIDER DETECTOR FACILITY

(CDF)

AUGUST, 1981



共同実験者 90名

## 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**

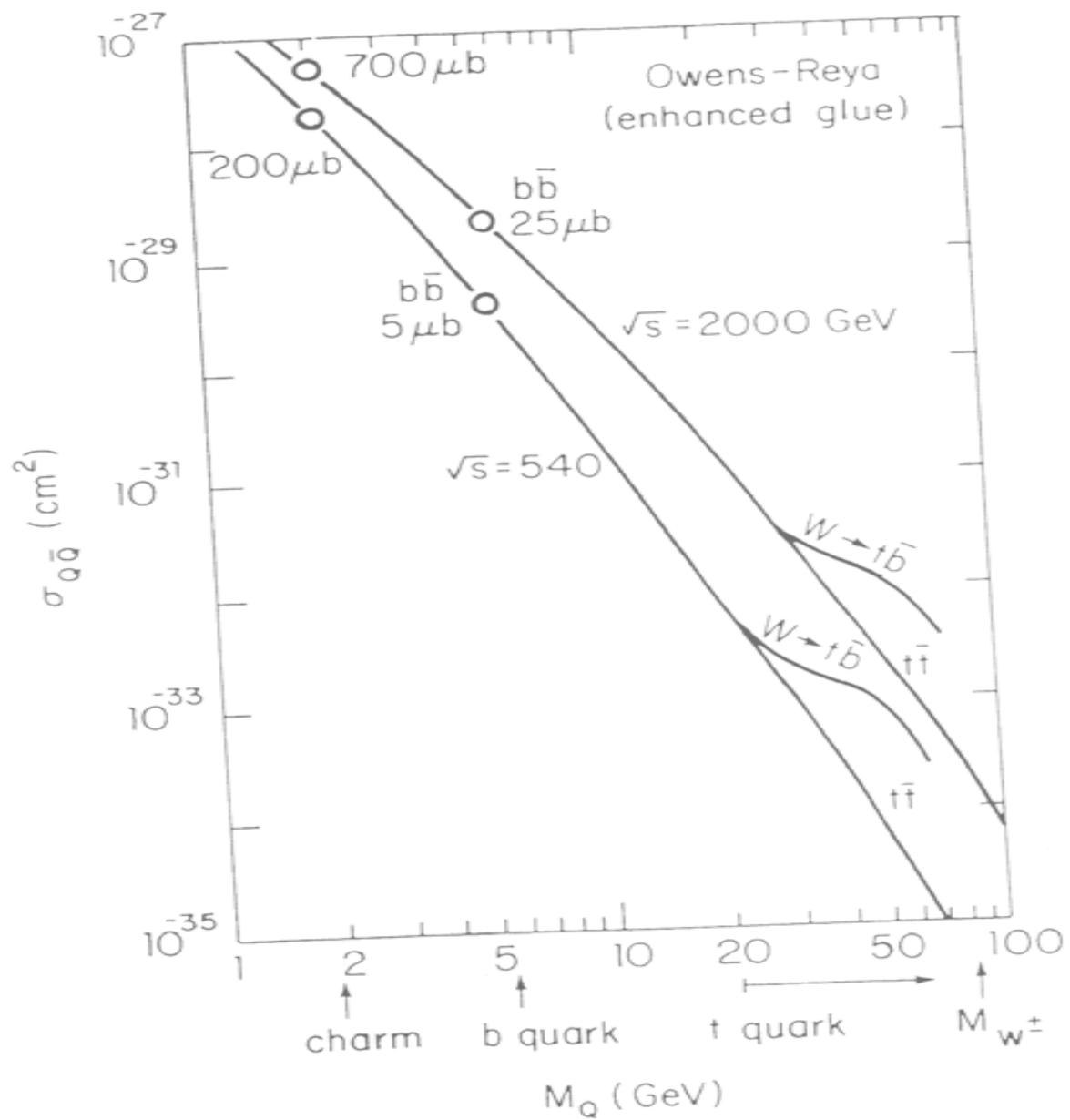


FIG 1 8

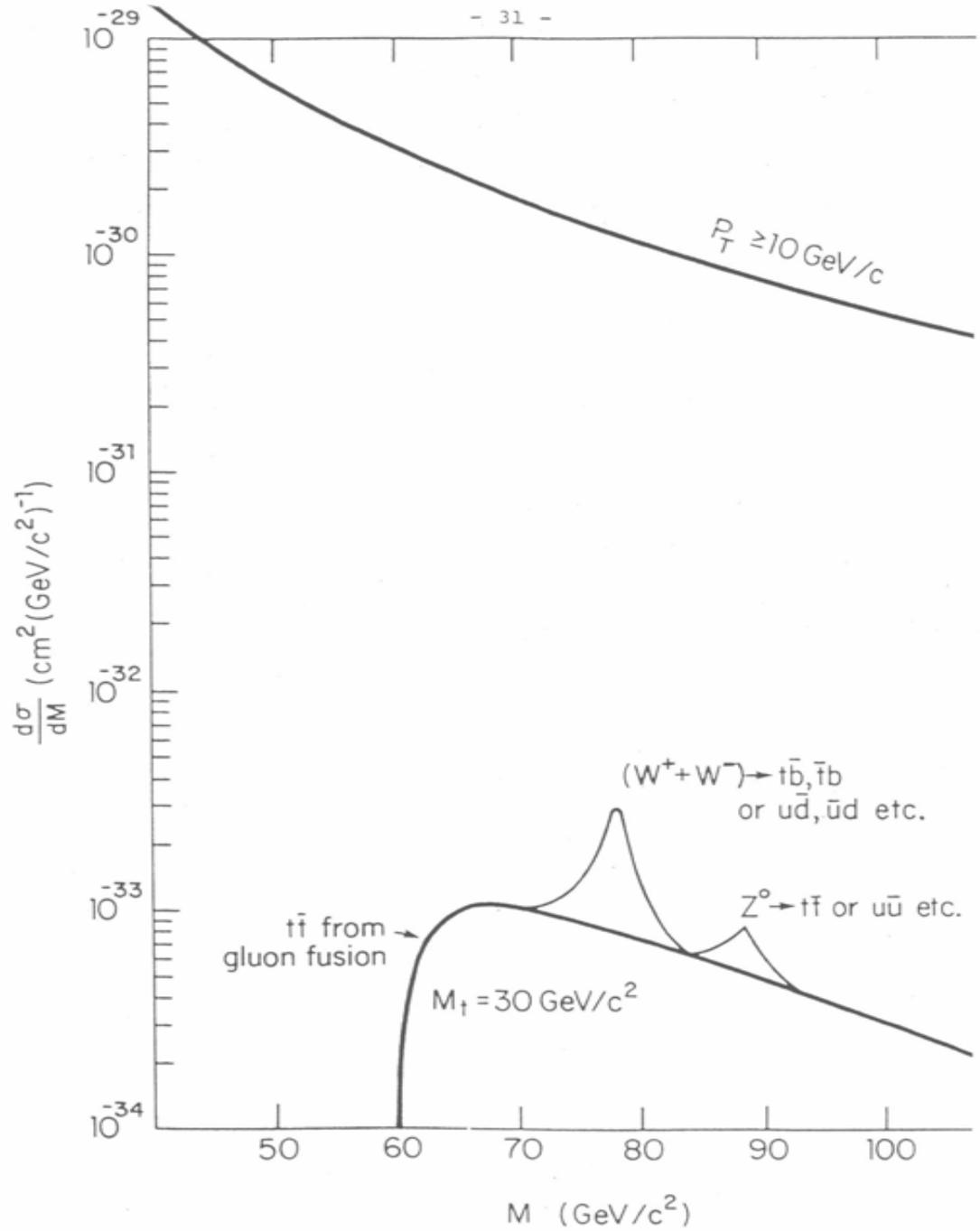
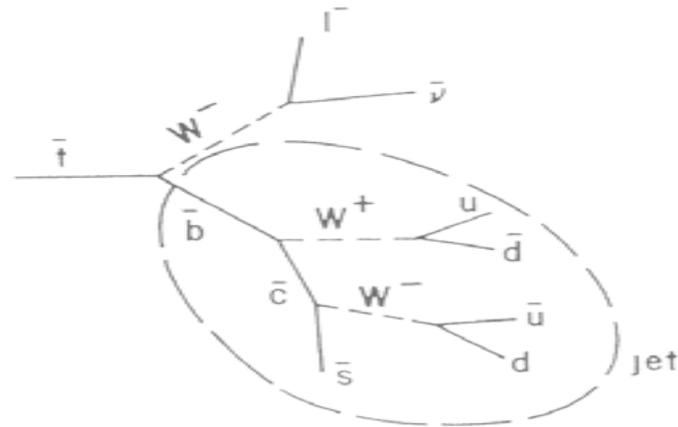


FIG 1.5

### 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  $25 \text{ GeV}/c^2$ .

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



Leptoonic W Decay

Hadronic W Decay

<u>Category</u>	<u>Topology</u>	<u>Approximate Branching Ratio</u>
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 Monte Carlo simulation.

## 2 TOP-QUARK SEARCH BY THE UA1

The top-quark search was made by the UA1 Collaboration via  $W \rightarrow t+b \rightarrow l+v+b$  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 the W boson  $\sigma_W(\sqrt{s}=1.8 \text{ TeV})/\sigma_W(\sqrt{s}=0.63 \text{ TeV})$

Table 1 Run Summary of the UA1 Experiment

TOP001

	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: $\sum E_T > 40 \text{ GeV}$
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) $\mu vbb$	3	
(3) $e vbb$	3	6

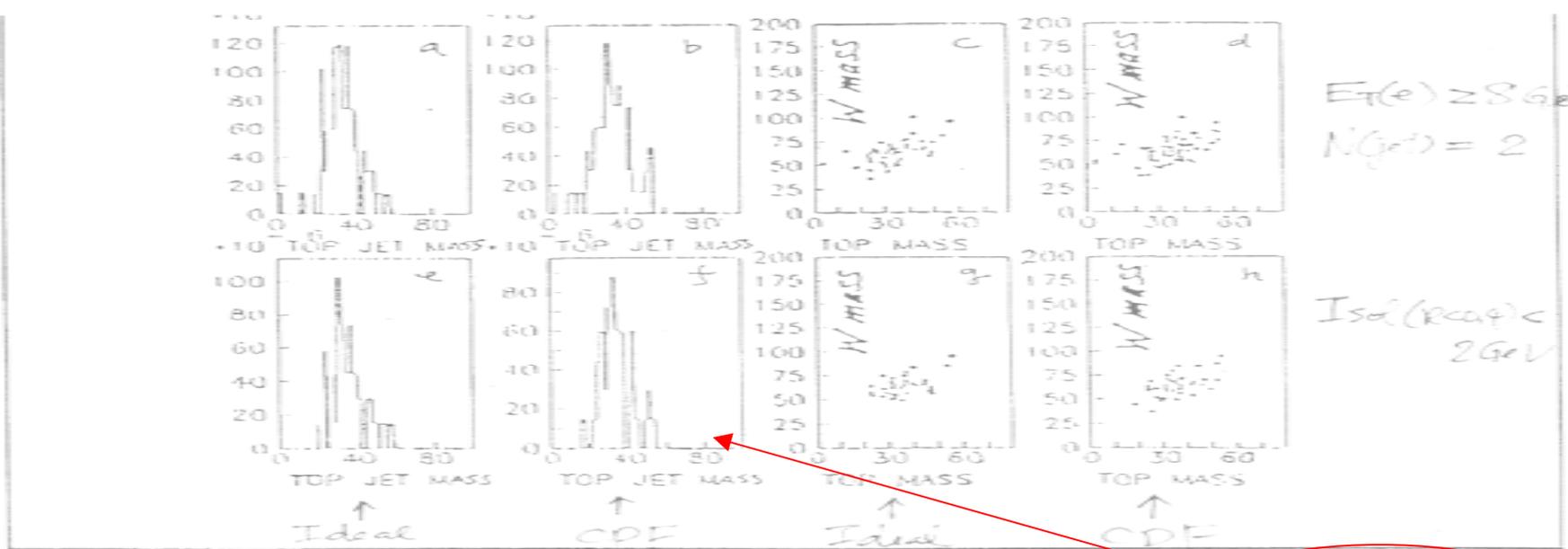


Figure 11 Same as Fig. 10 for top-quark signal sample with ODORICO.

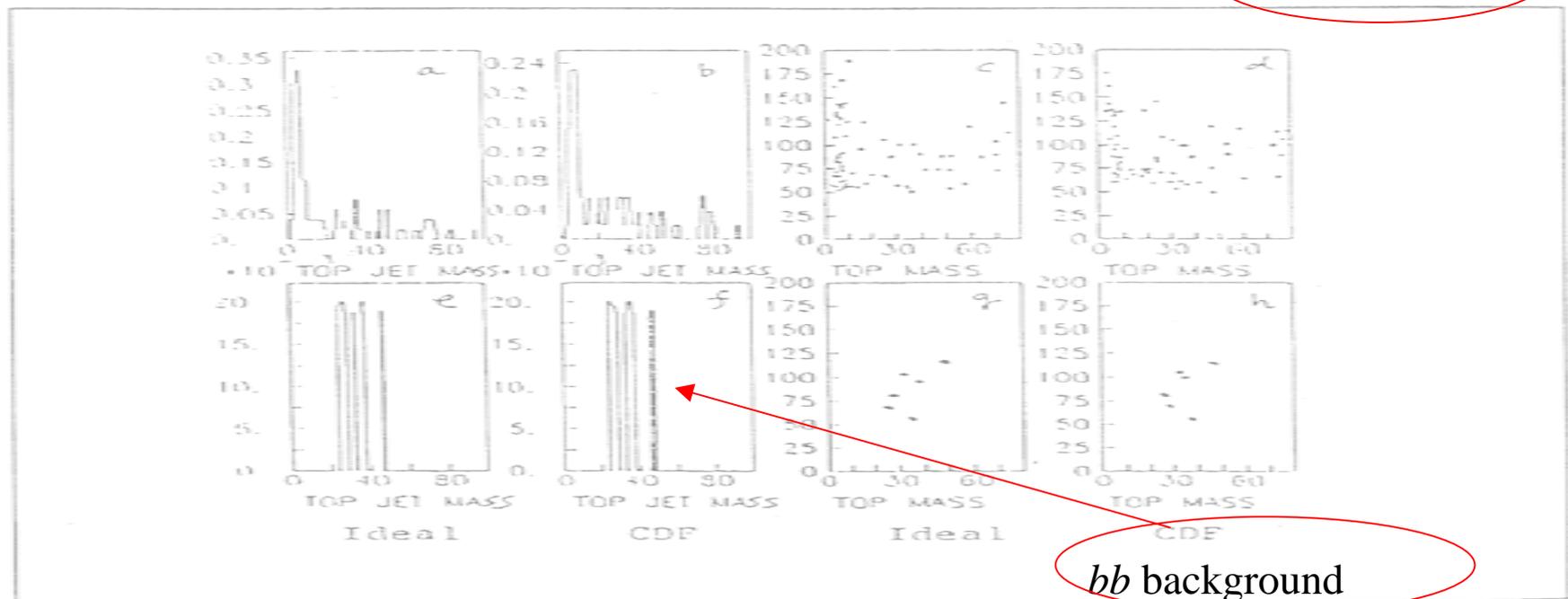


Figure 12 Same as Fig. 10 for  $bbX$  background sample with ODORICO.

#### 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  $\sqrt{s} = 2$  TeV,
- (2)  $W \rightarrow t+b$  with ODORICO at  $\sqrt{s} = 2$  TeV,
- (3)  $bbX$  background with ODORICO at  $\sqrt{s} = 2$  TeV,
- (4)  $W \rightarrow t+b$  with ISAJET at  $\sqrt{s} = 540$  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  $\sqrt{s} = 2$  TeV and 76 % at  $\sqrt{s} = 540$  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  
 $40 \text{ GeV}/c^2$ 付近のピーク  
を作る。

# 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

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

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.

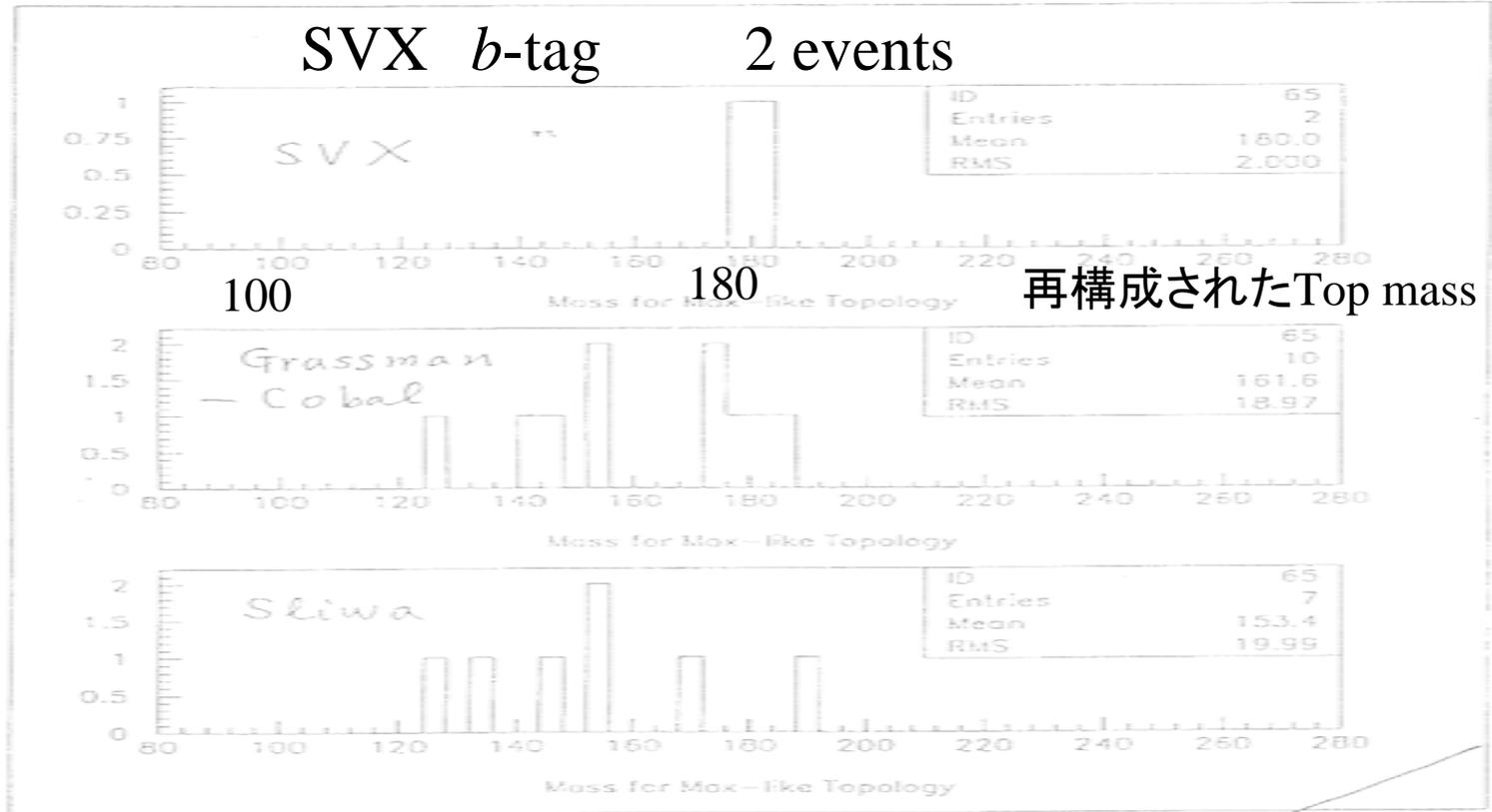
Muon Pt  $> 20 \text{ GeV}$

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

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

< 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:  $\beta_T$  cut

5: isolation

We should use a common set of energy correction.

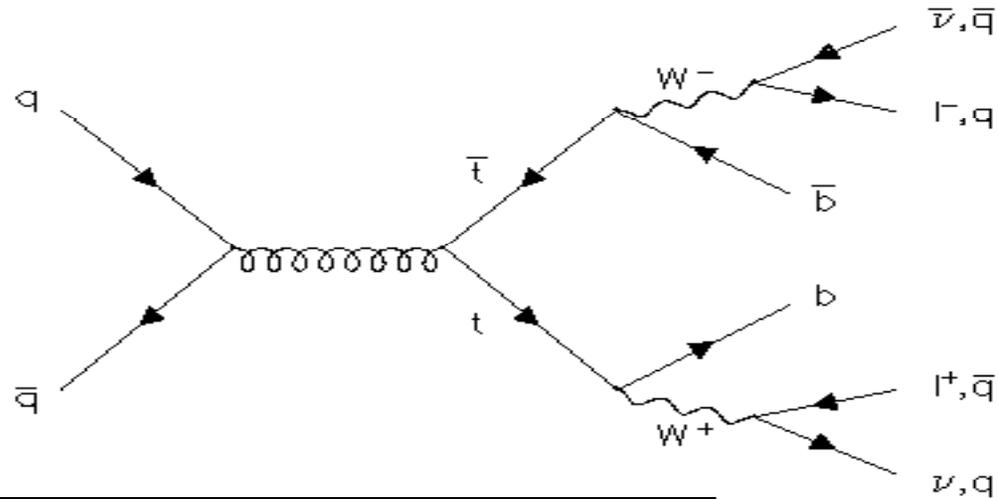
## 4 Summary

- 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  $W + \text{jets}$  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

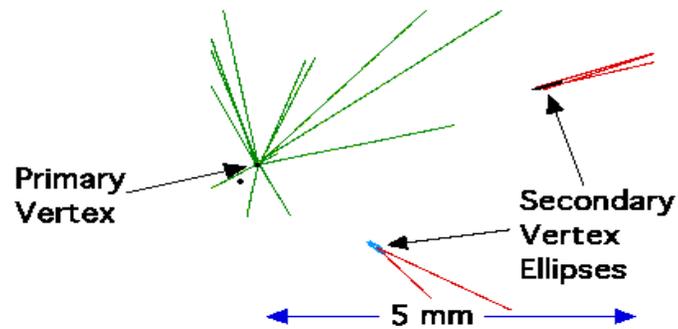
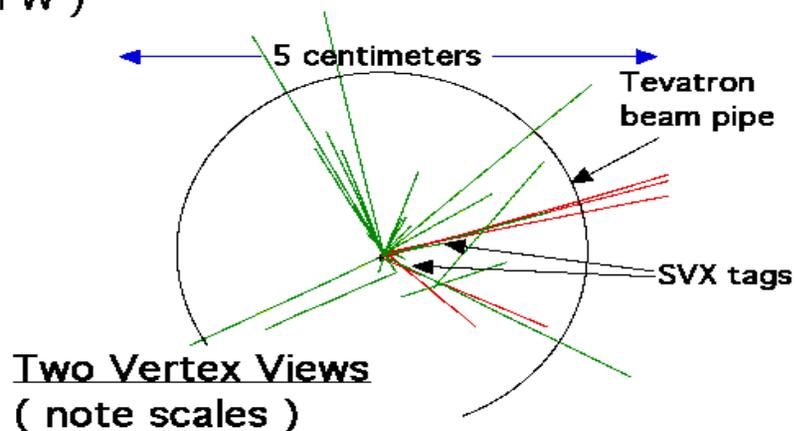
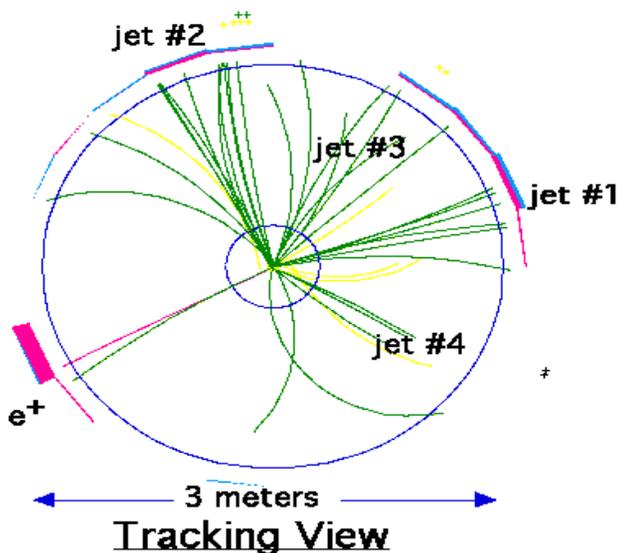
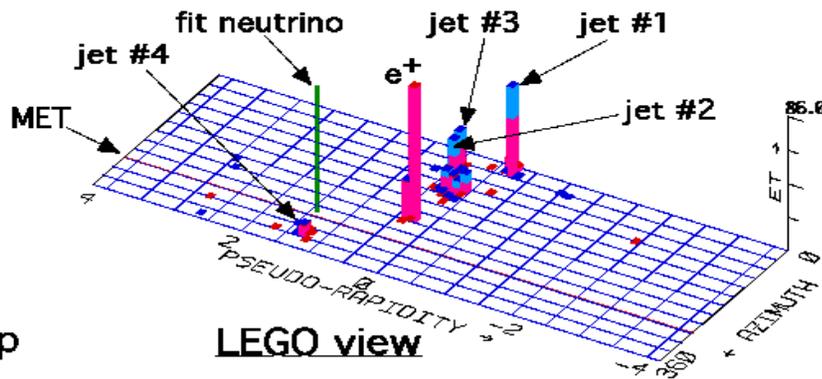
24-September, 1992

TWO jets tagged by SVX

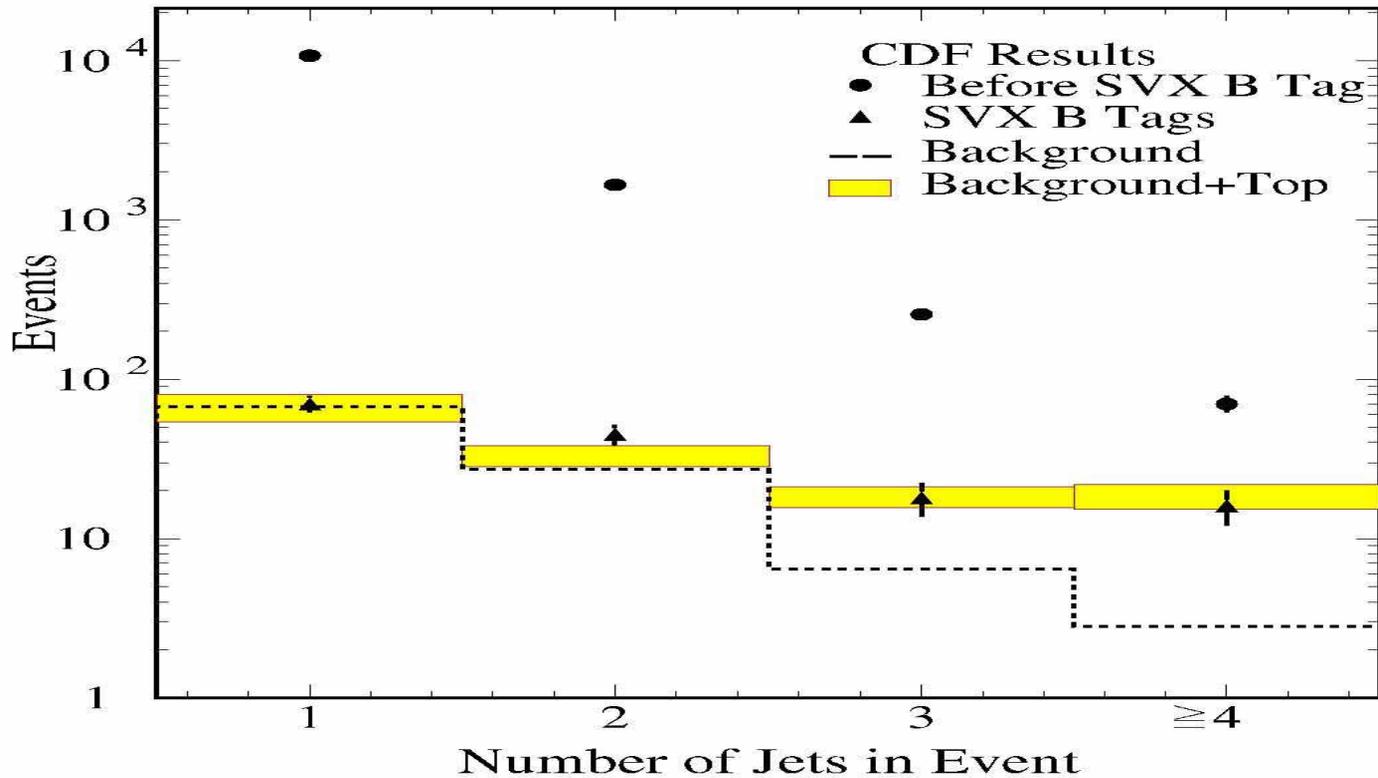
fit top mass is 170 +/- 10 GeV

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

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



# $W(\rightarrow l\nu) + \text{ジェット事象のジェット数分布}$



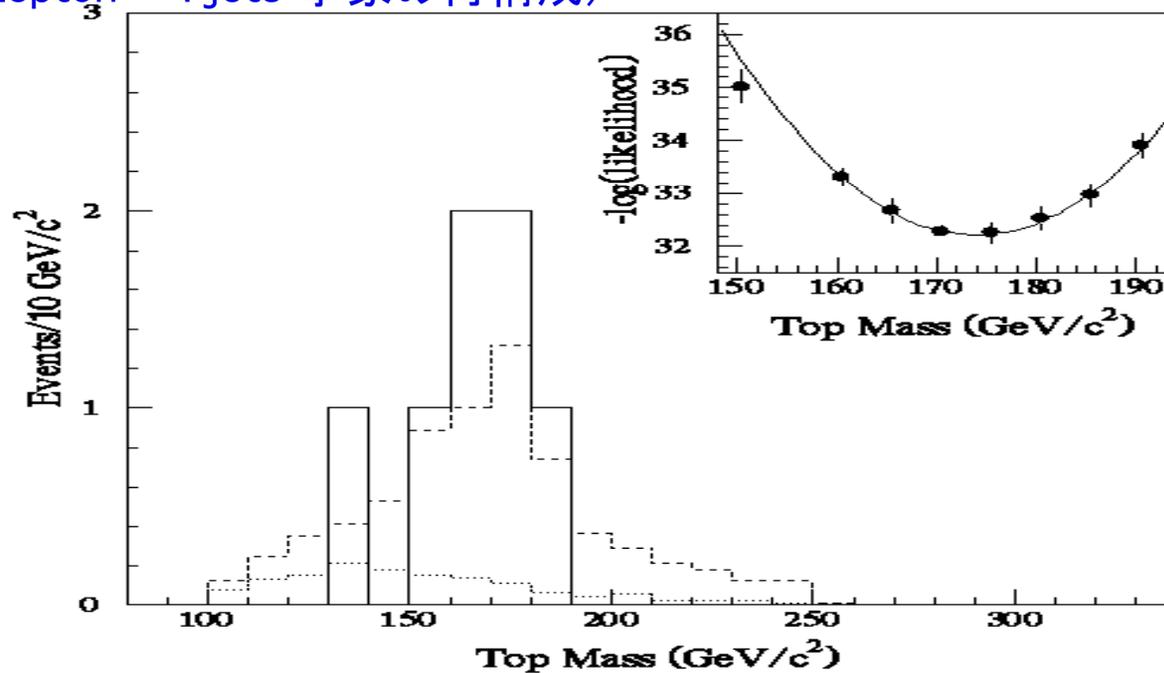
# トップクォーク生成の証拠

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)



$$M_{\text{top}} = 174 \pm 10 \text{ (統計)} +13/-12 \text{ (系統)} \text{ GeV}/c^2$$
$$\sigma(t\bar{t}) = 13.9 +6.1/-4.8 \text{ pb}$$

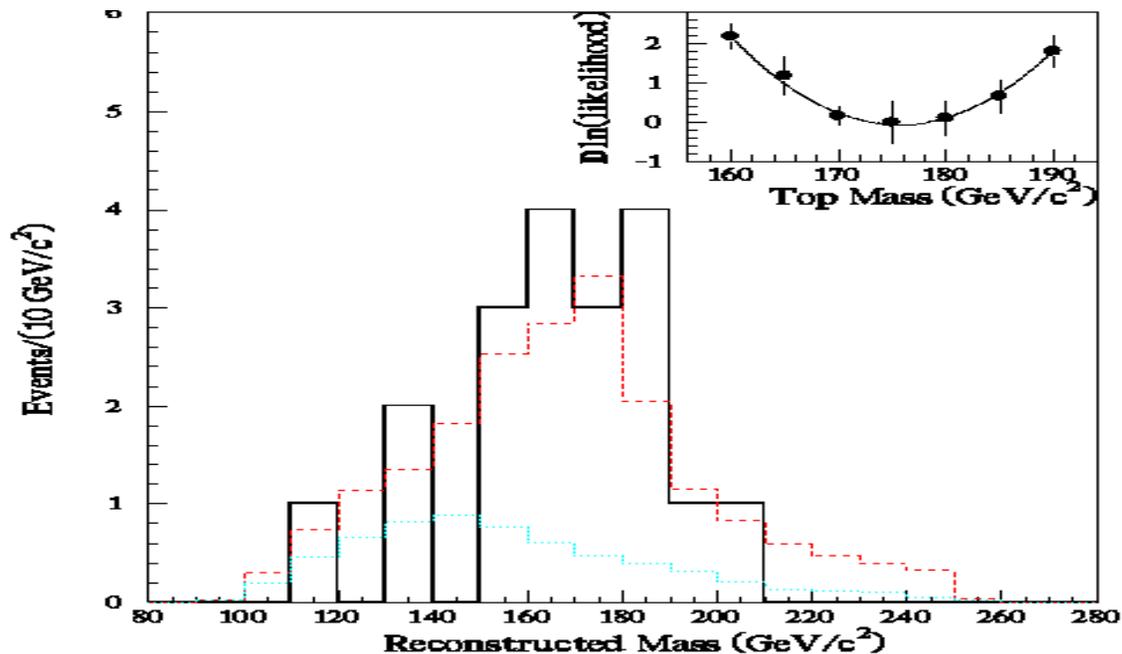
# トップクォーク生成の確認

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

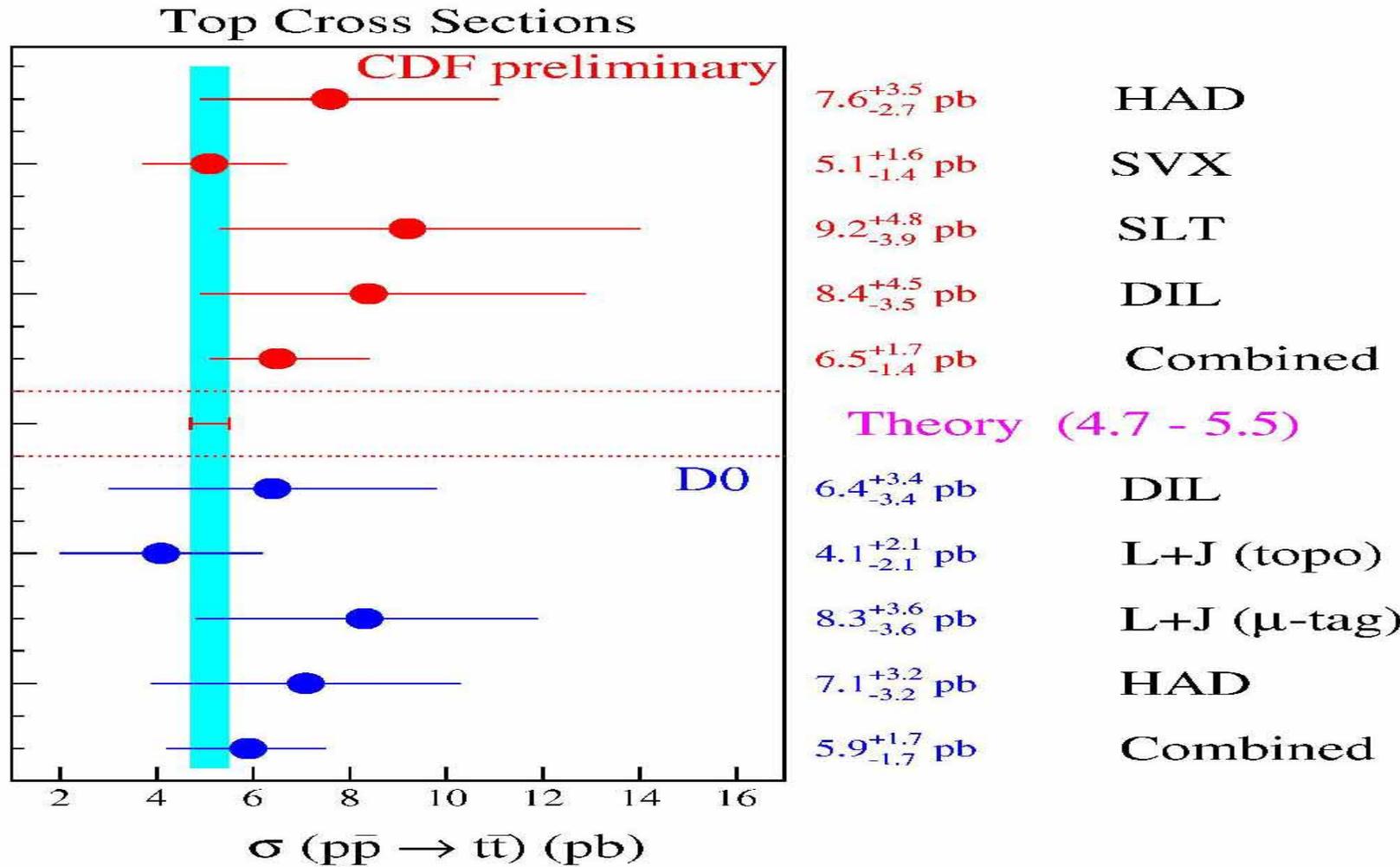
バックグラウンドの推定: 0.4 ± 0.1 事象

## 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



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

# 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。

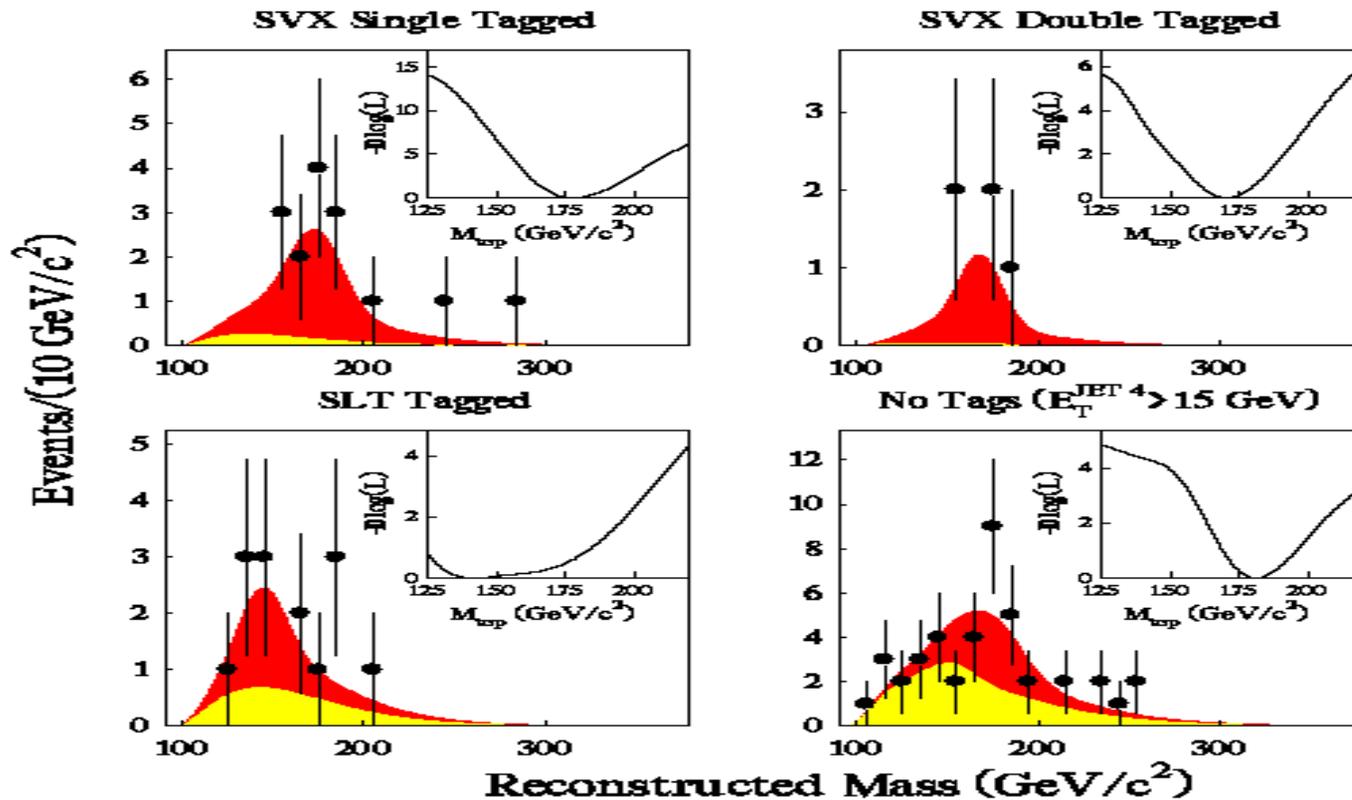
$P_z(\nu)$  の 2 つの解を試す。

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。

# 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

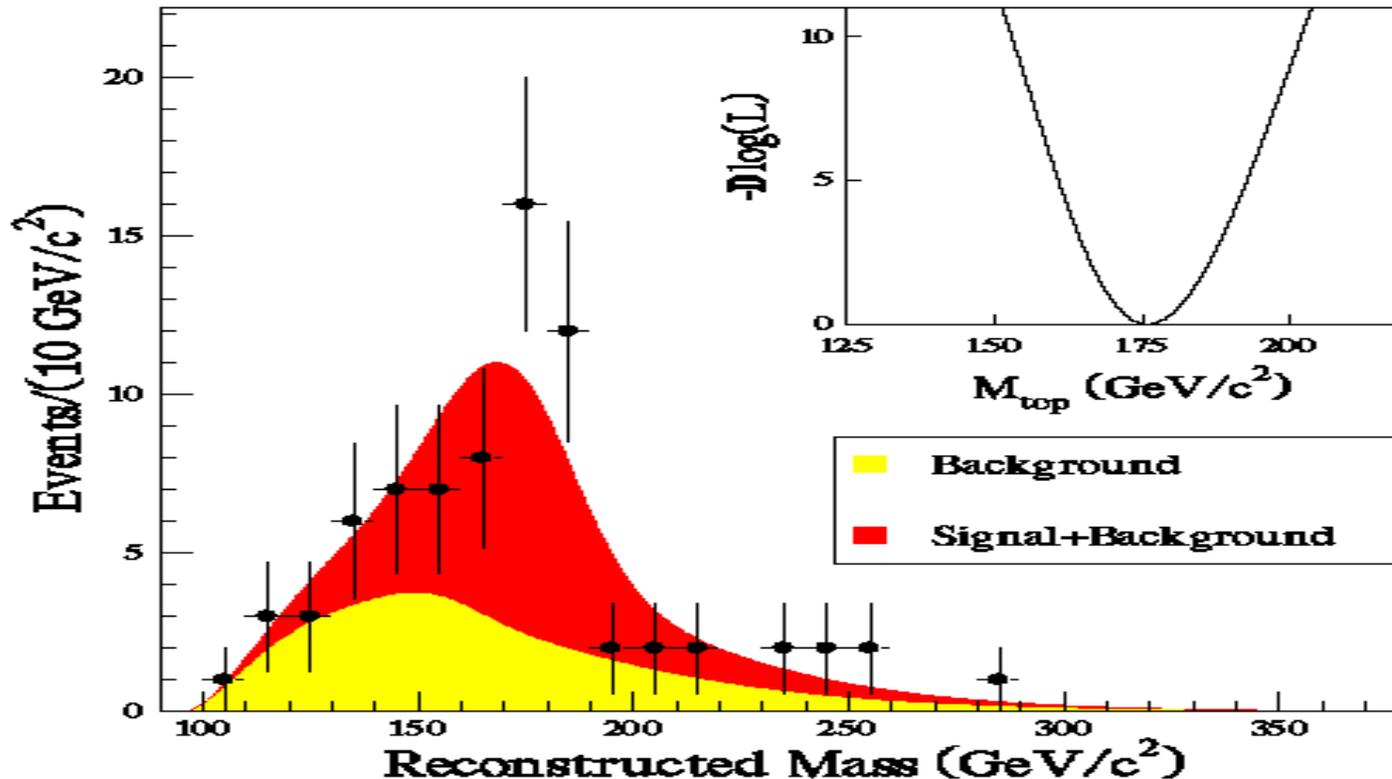


bkgd(主に W + jets 直接生成)は推定値 に constrain して、質量分布を(質量  $M_{top}$  の信号)+ (bkgd) にフィットして  $M_{top}$  を決める。

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	42	56 ± 15	181.0 ± 9.0

(ET(jet4) > 15GeV)

# 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。

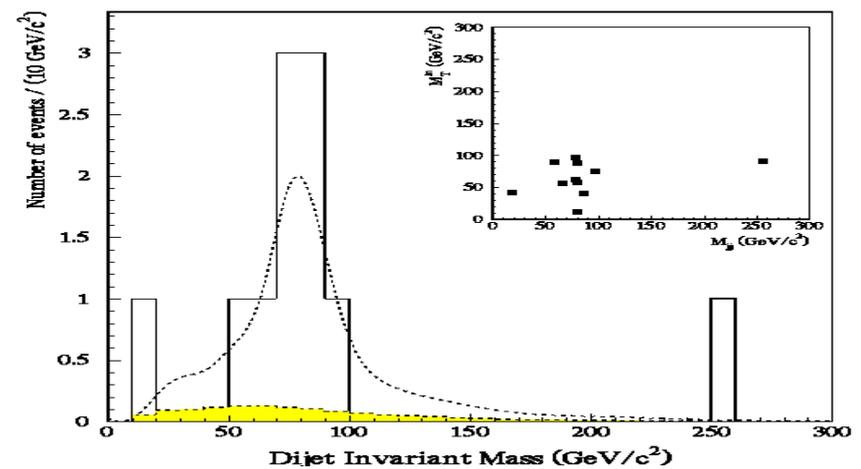
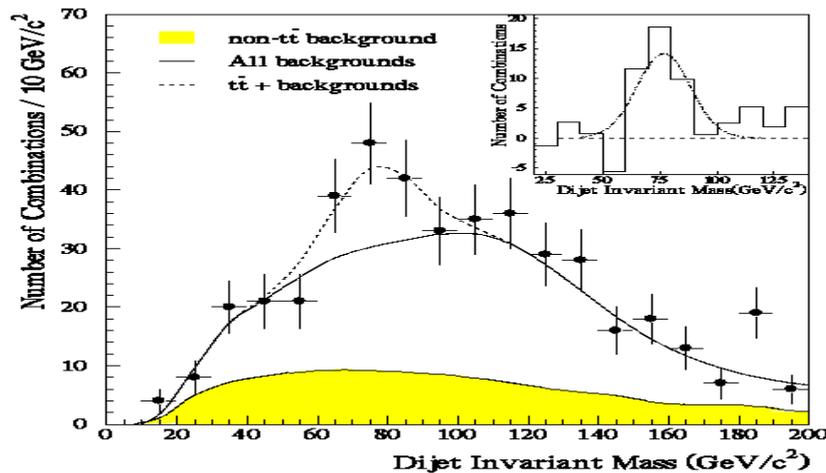
# Wボソンのハドロン崩壊の観測 PRL('98)

レプトン+ $\geq$  4ジェット事象の中の2ジェットの不变質量分布:

(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、

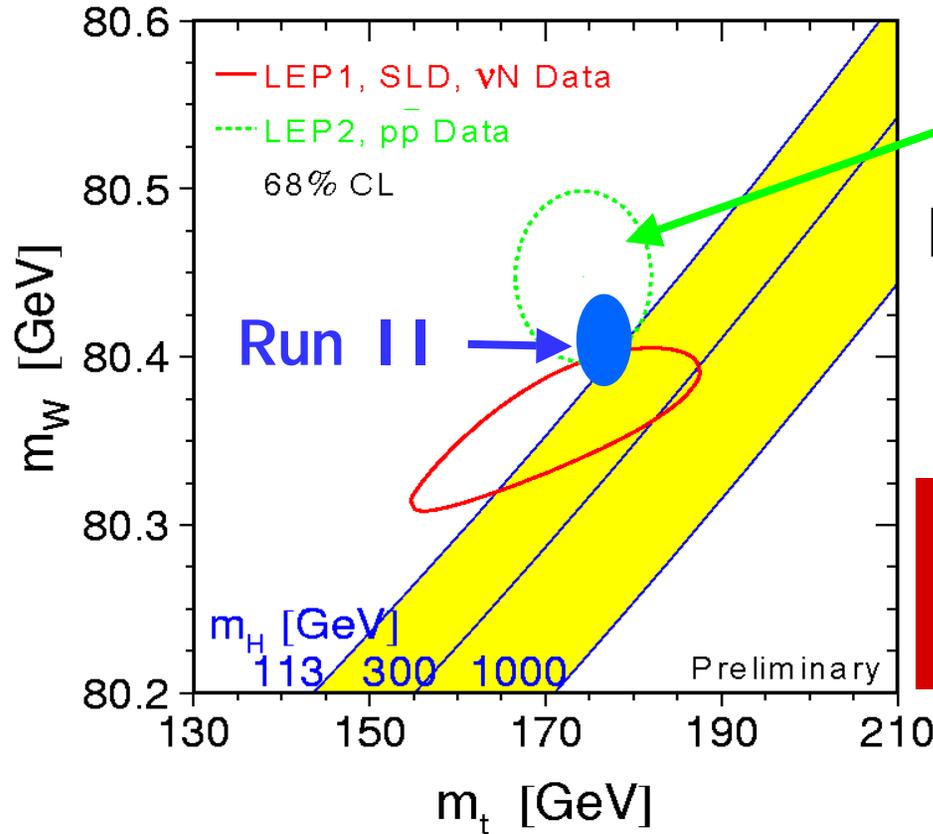
●  $W \rightarrow 2 \text{ jets}$ の信号の統計的有意性は

$3.3\sigma$  ( 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。

# 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 ) :

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

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

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

# $B_c$ 中間子の発見

15種類の基本的な中間子

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

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

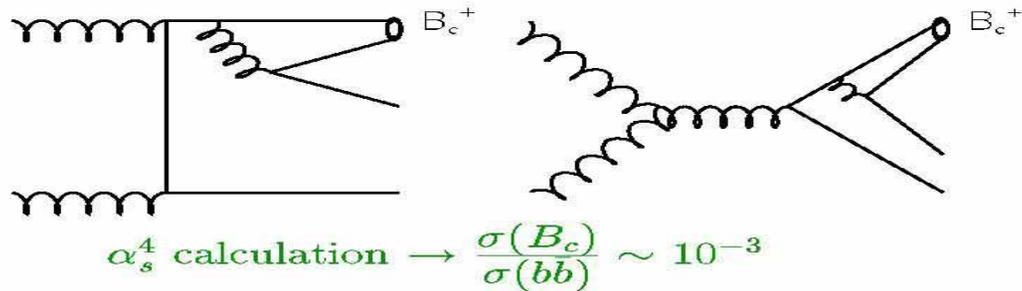
## 重いクォークの束縛状態 $B_c$ 中間子の発見

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>

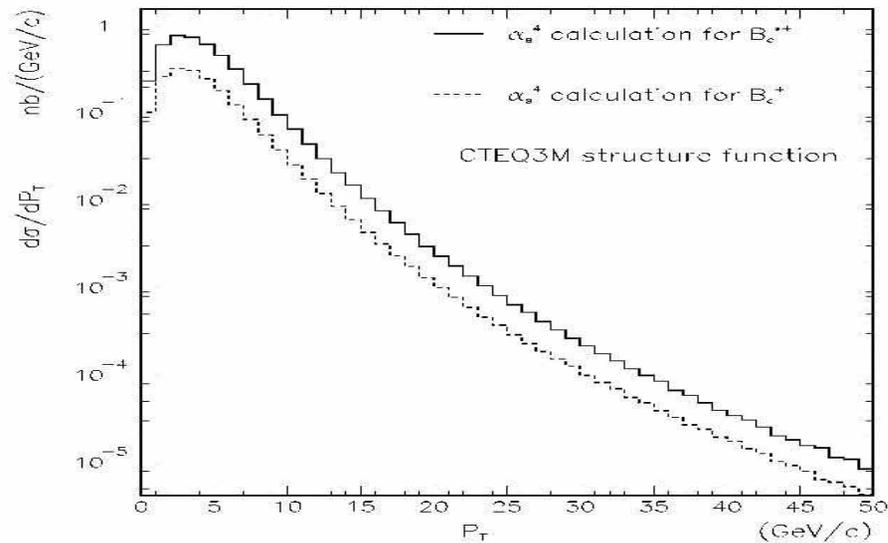
鈴木潤一 <高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所 305-0801 つくば市大穂 1-1 e-mail: jsuzuki@bmail.kek.jp>

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.



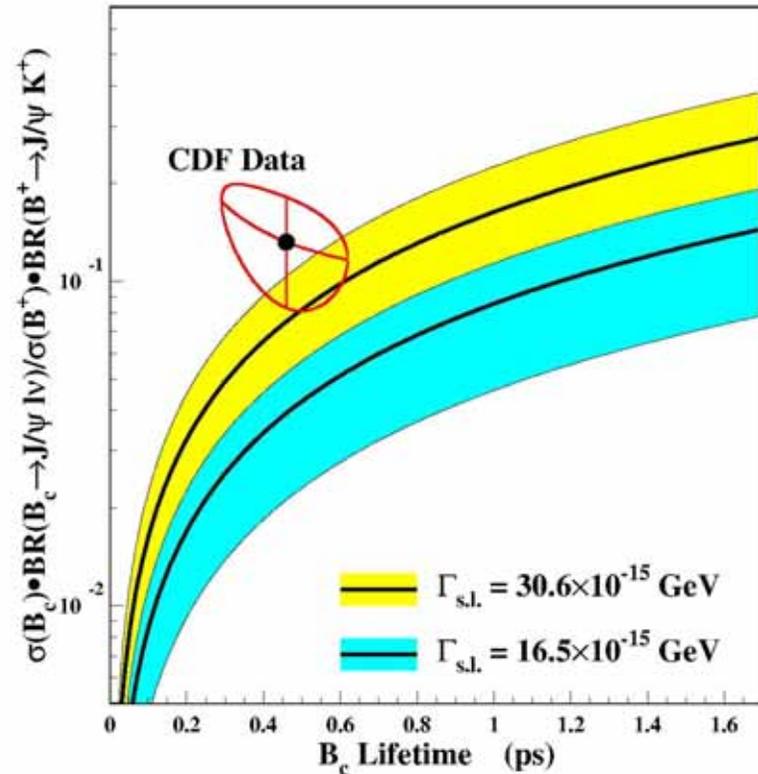
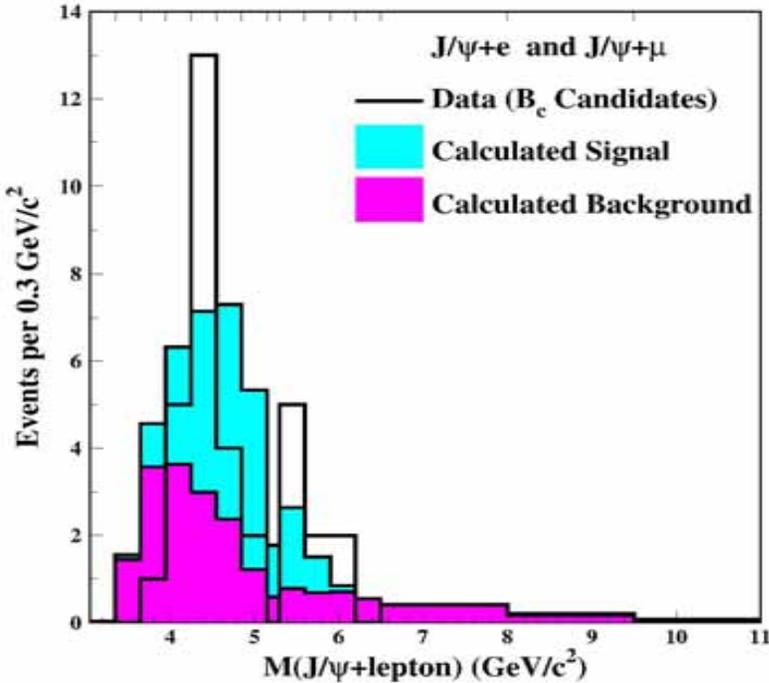
# $B_c$ 中間子の発見(1998年)

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



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

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

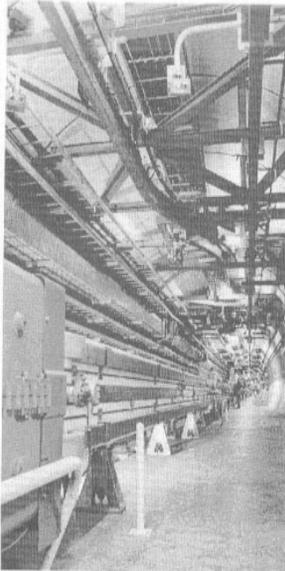
$$\frac{\sigma(p\bar{p} \rightarrow B_c X) \text{BR}(B_c \rightarrow J/\psi \ell \nu)}{\sigma(p\bar{p} \rightarrow B_u X) \text{BR}(B_u \rightarrow J/\psi K)} = 0.132^{+0.061}_{-0.052}$$

# 重さの正体つかまえる

## カギ握る粒子「ヒッグス」 欧州チーム「存在示唆」

物には重さがある。当たり前のようだが、物理学的に説明しようとするとき、簡単に「質量の大きさ」を振る。未知の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」など新たな枠組みづくりにつながる可能性もある。日米欧の大規模加速器計画にもはつきりがつきかけた。

(杉本 聖)



ヒッグス探しのため、運転時間が11月2日まで延長されたCERNの加速器LEP。スイス・フランスの国境にある(CERN提供)

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ォークの集まり。標準理論によれば、私たちが知っているのは、六種類のクォークと、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。

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

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」と説明付けた。未知の粒子は「ヒッグス」と呼ばれる。米国フェリス国立加速器研究所の加速器パイオニアでヒッグス探しに挑む金信弘・筑波大学教授によ

ると、標準理論では、ヒッグスは少なくとも四種類からなる。宇宙の誕生直後に消え、質量を与える粒子になった。これら消えた三種類には質量がなく、観測することはできない。残った二種類が「見えるヒッグス」。自然界では、高いエネルギーを持つ陽子同士が衝突するようなら、場合によっては現れない。人工的につくるには非常に高

だ、あと二カ月で終わる。今度の理由がヒッグス探しではない限り、今月末で終わる予定だったが、今度の理由をうけて、十一日までに結果をうけて、十一日までに約一カ月の延長が決まりました。それまでに確定できるかどうかは、微妙なところだ。(駒宮さん)

### 既存の加速器にチャンス

とろろが最近、一兆電子ボルトとされていたヒッグスの質量が、千五百億電子ボルト以下と修正された。これならCERNの運転中の加速器LEPや、テバトロンでも

観測された。存在しないの可能性がある。存在する確率は一数字。存在する可能性が高まった。この場合の質量は千五百億電子ボルト程度。同センターの駒宮聖男教授はアレフの結果について

慎重な見方を示す。「観測したのは、ヒッグスが崩壊したときのみならず、約五通りのパターンのおろろろだけ。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

り、LHCはもちろん、日本が中心となってアジアで進めているJLC計画に期待がかかる。二十〇〇〇年直線型の加速器で、二〇一〇年前後の運転開始を目標にしている。

### 大統一理論への糸口にも

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。

「強い力」を加えた三つの力の統一を目指す「大統一理論」は、標準理論の粒子をそれぞれ、地球の自転に相当するスピンの値が異なる粒子があるとすると「超

対称性」が重要な柱の一つ。超対称性を前提とする大統一理論は、質量千五百億電子ボルト以下の「軽いヒッグス」の存在を予言している。「見えるヒッグス」が正体かわかれば、大統一理論の入り口に立つことになる」と金さん。

「LHCはヒッグス以外の粒子もつくる。上空から全体を見渡すような加速器だ。これに対し、ヒッグス工場としてこの粒子をしゃぶりつくすJLCのような加速器もますます必要になる」

# 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。

# ヒッグス粒子の探索

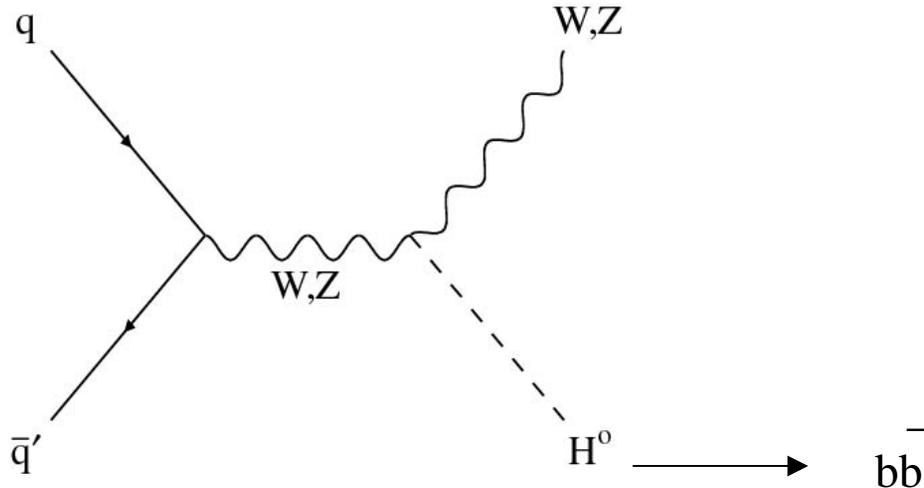
## 軽いヒッグス粒子 ( $M_H < 150\text{GeV}/c^2$ )

陽子中のクォーク

q

反陽子中の  
反クォーク

$\bar{q}'$



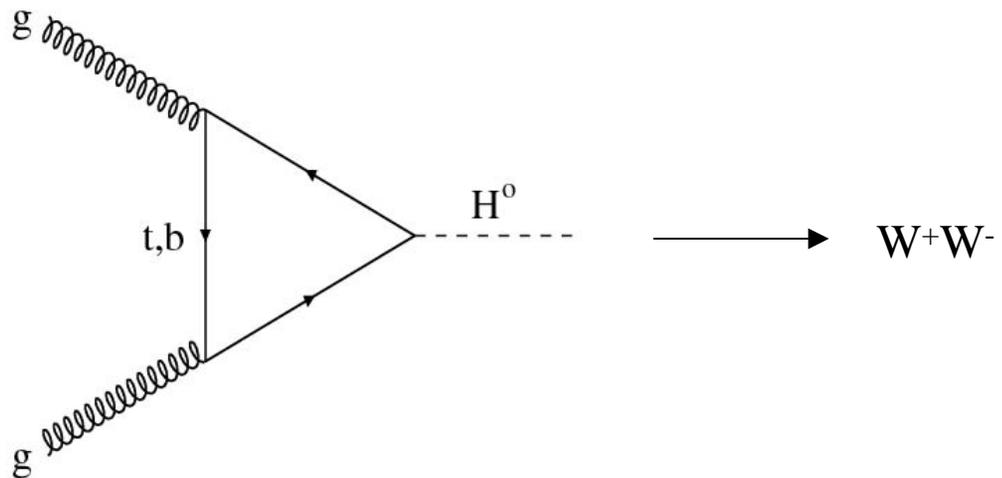
## 重いヒッグス粒子 ( $M_H > 150\text{GeV}/c^2$ )

陽子中のグルオン

g

反陽子中のグルオン

g



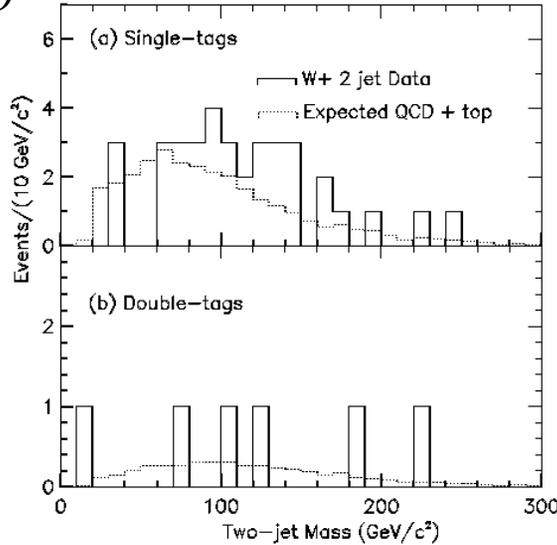
# ヒッグス粒子(標準模型)の生成断面積と崩壊分岐比

生成断面積

生成断面積 $\times$ 分岐比

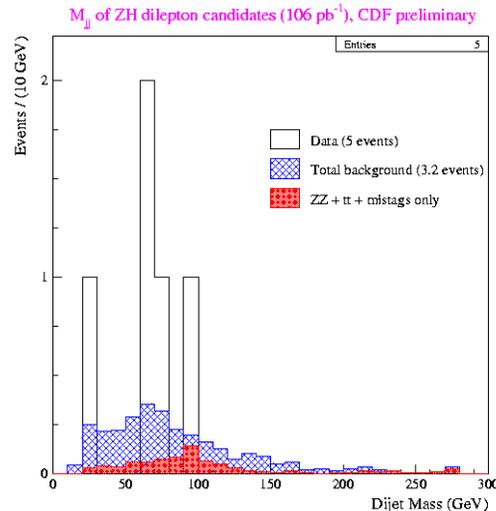
# CDF Run I VH searches ( 106 pb<sup>-1</sup>)

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



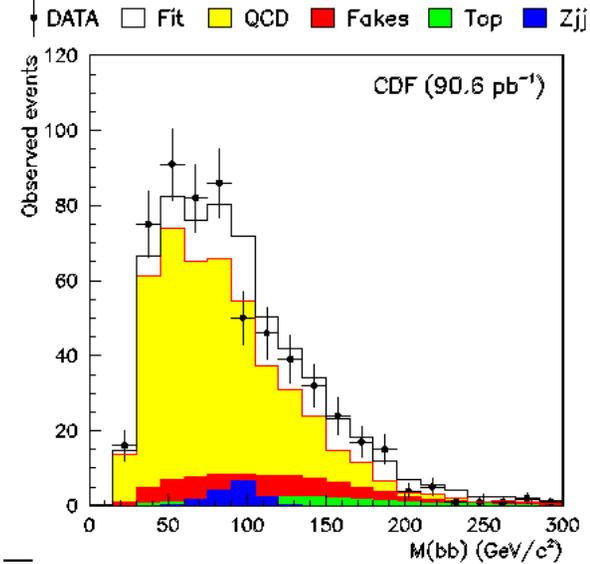
Expect: 30±5 st  
6.0±0.6 dt  
Observe: 36 st  
6 dt

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



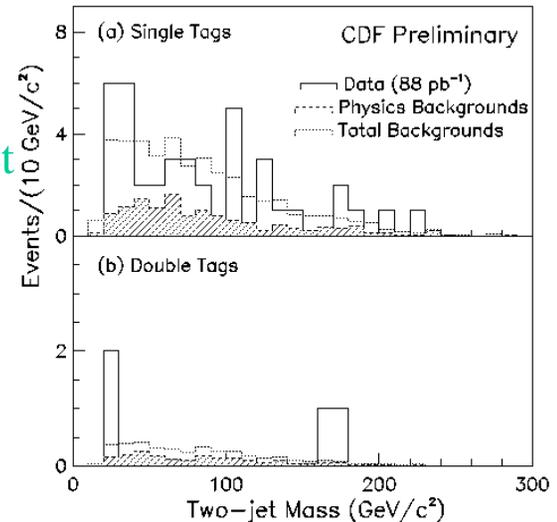
Expect: 3.2±0.7 st  
Observe: 5

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



Expect:  
600 events  
Observe:  
580 events

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

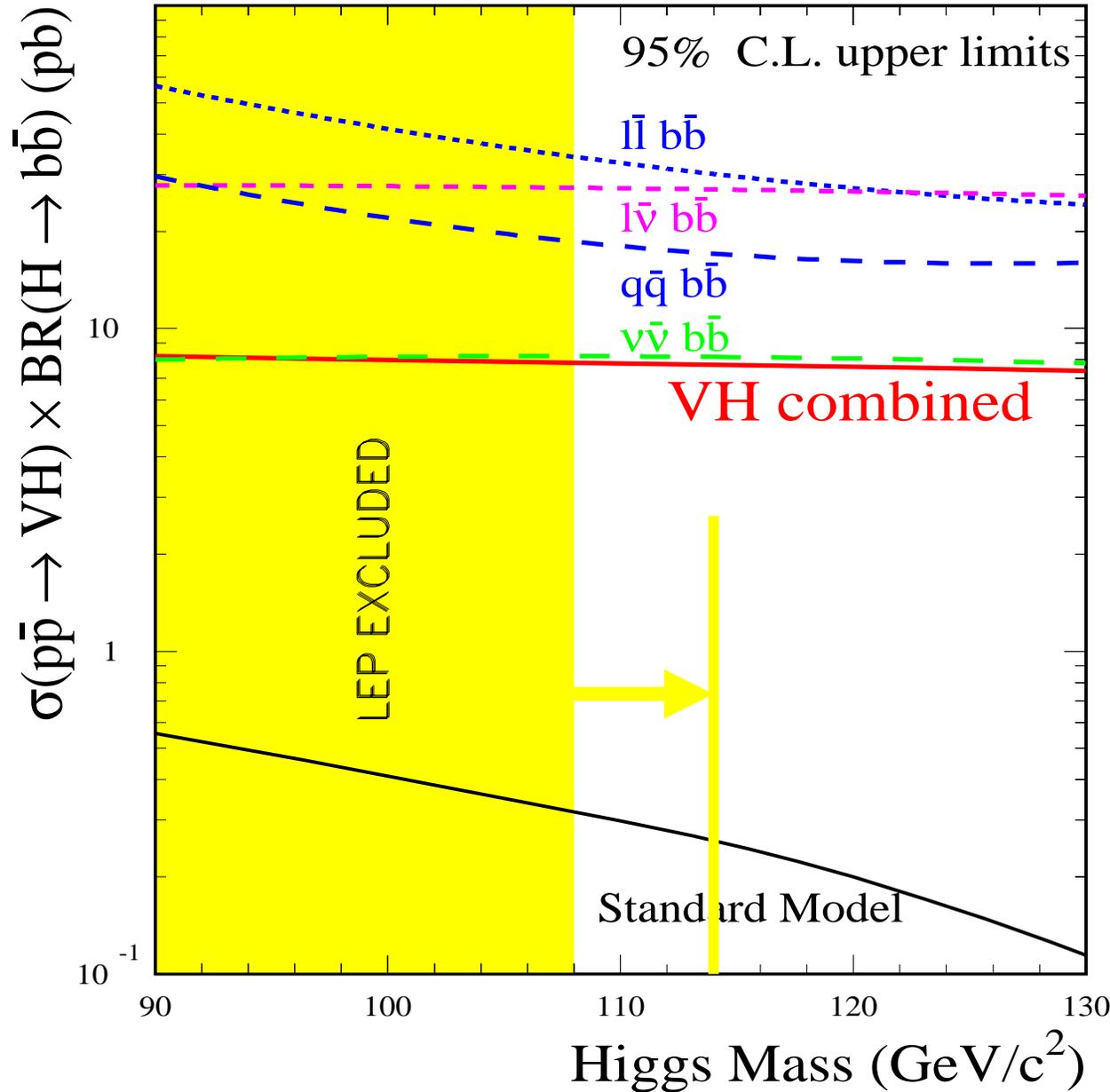


Expect: 39.2±4.4 st  
3.9±0.6 dt  
Observe: 40 st  
4 dt

# 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

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

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

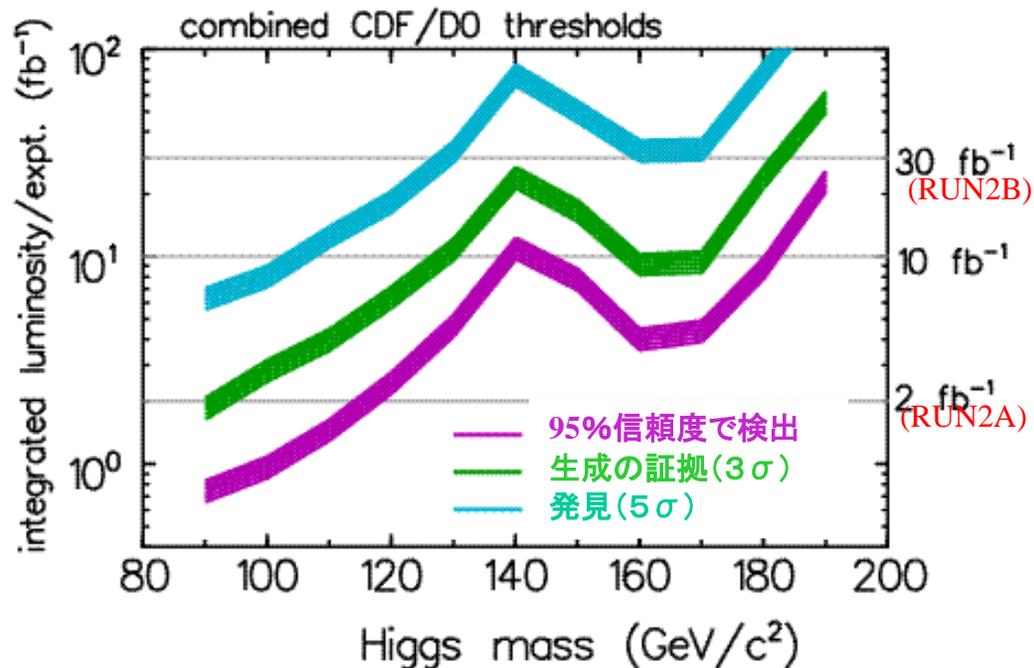
- $125 < M_H < 160 \text{ GeV}/c^2$

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

(like-sign dilepton + jets)

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

$$pp \rightarrow H X \rightarrow W W X \rightarrow l \nu l \nu X$$

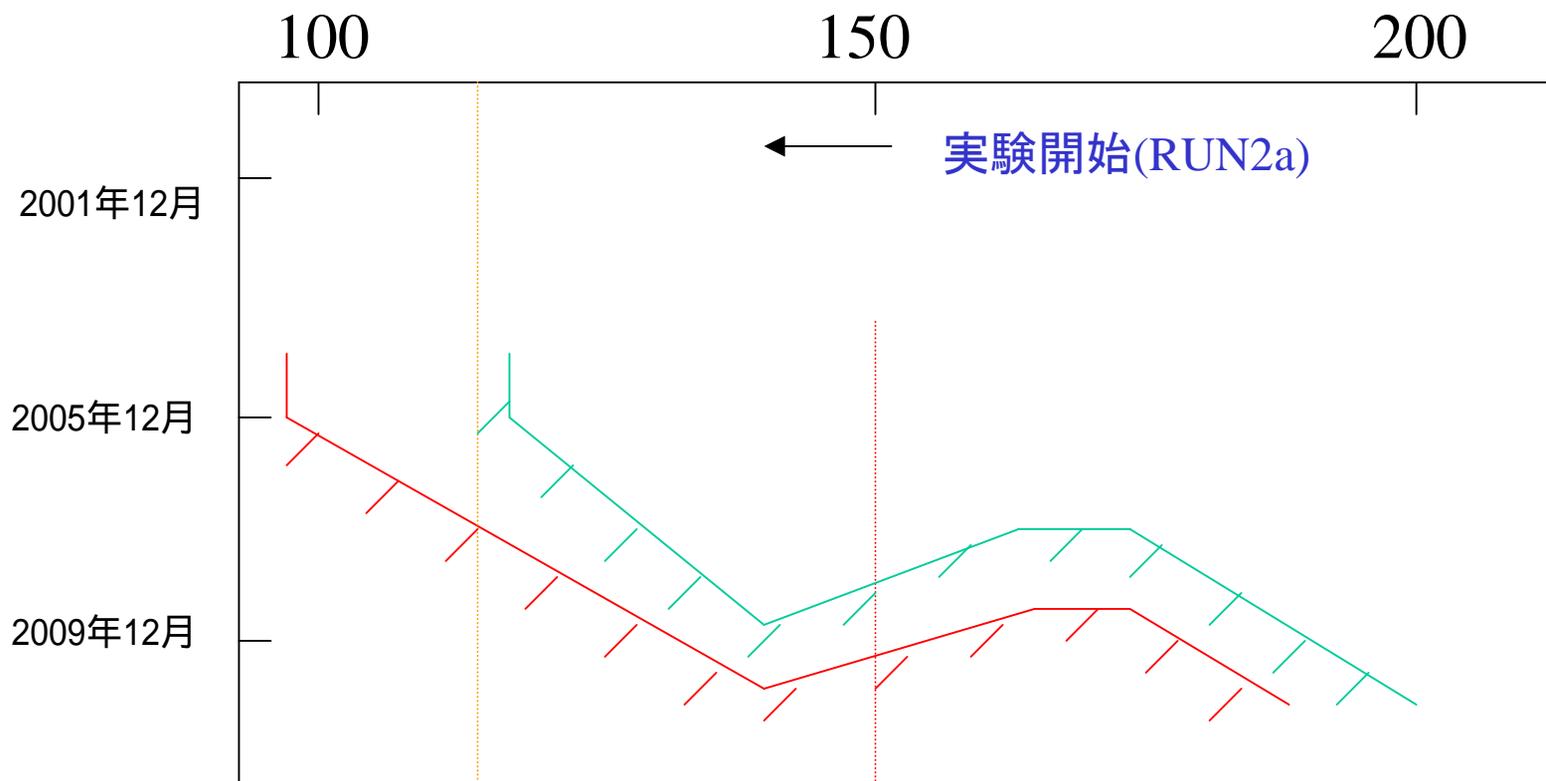


RUN2 (~2009)

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)

# 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 $M_H$ )



LEP 2 の  
ヒッグス粒子

超対称性理論の軽い  
ヒッグス粒子の質量上限

# 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( $3\sigma$ )。

# 超高エネルギー衝突実験の現状と計画

