

宇宙創生を素粒子物理学で探る

一朝永博士の切り拓いた素粒子物理学

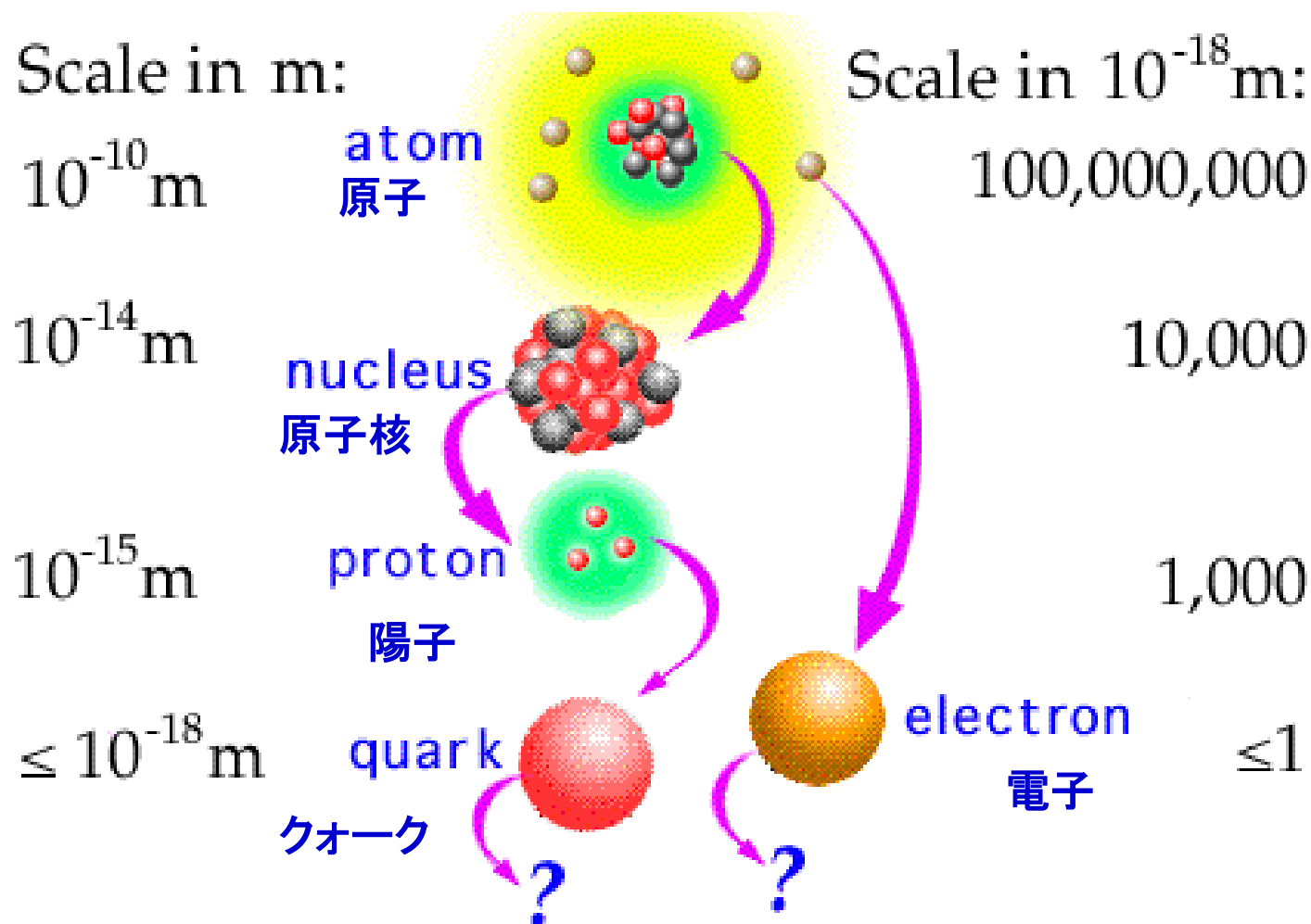
金 信弘

筑波大学大学院数理物質科学研究科物理学専攻
理工学群物理学類

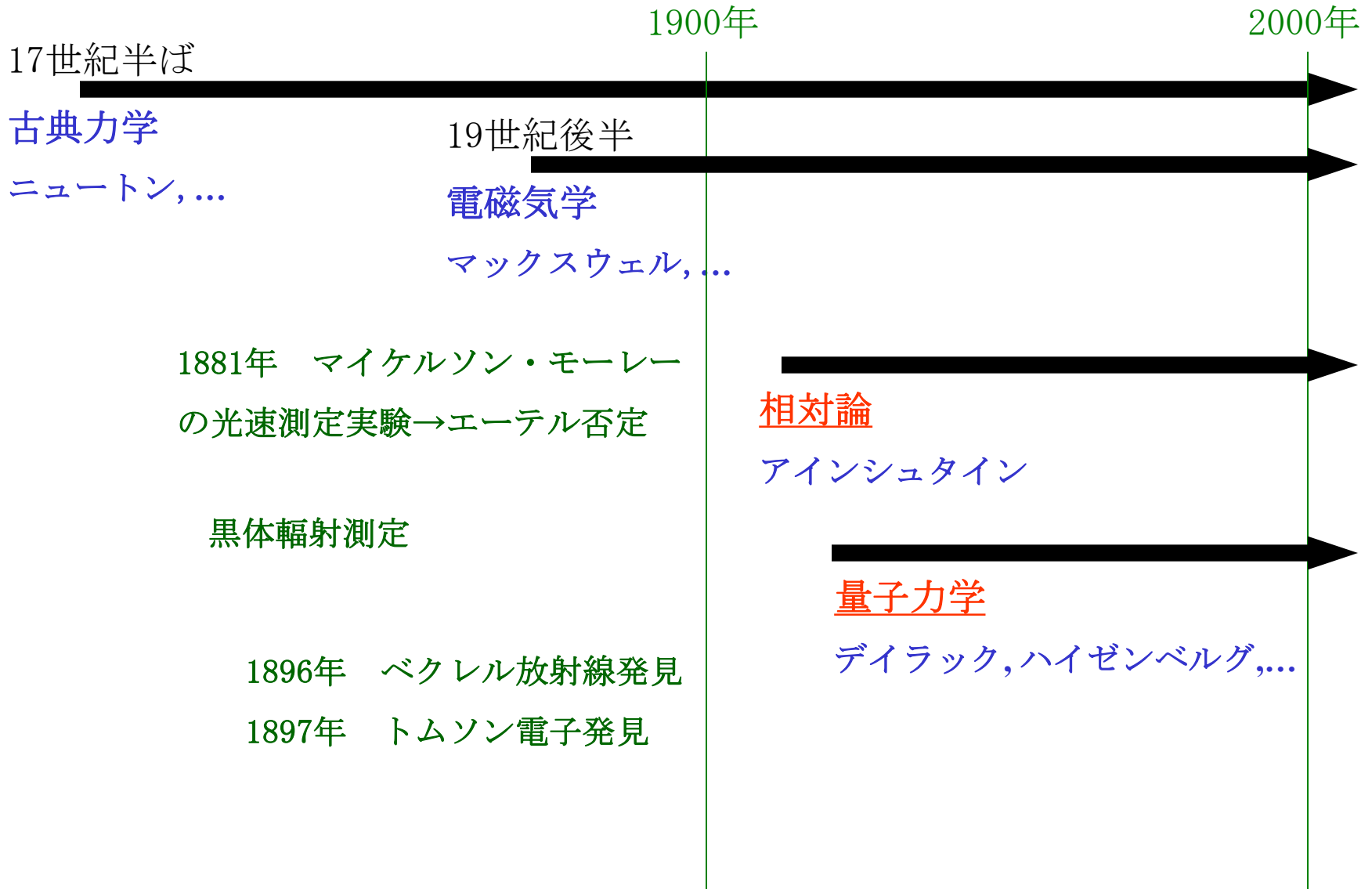
朝永振一郎博士生誕100年記念出前講義
於竹園高等学校
2006年11月8日

- はじめに
- 高エネルギー陽子反陽子衝突実験(CDF実験)
トックオークの発見
ヒッグス粒子の探索
- 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： μ 粒子の発見 (C. Anderson)

1950

1948年：量子電磁力学QED (くりこみ理論)
(朝永振一郎, R. Feynman, J. Schwinger)



朝永振一郎

(ともなが しんいちろう)



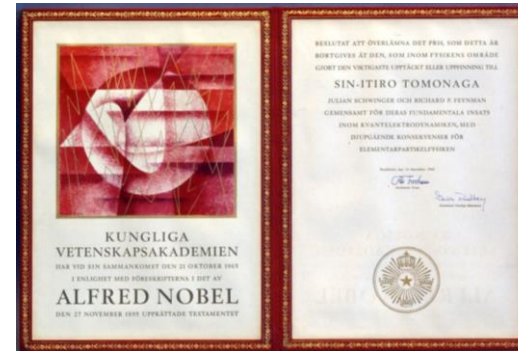
1906年3月31日

東京小石川生まれ

1965年 ノーベル物理学賞

素粒子物理学

(湯川秀樹に続き、日本で2番目)



1941年～ 東京文理科大学

(現:筑波大学)教授

1956-1962年 東京教育大学

(現:筑波大学)学長

日本のノーベル物理学賞



1949 湯川秀樹

核力の研究と中間子の予言



1965 朝永振一郎

量子電気力学

1973 江崎玲於奈

半導体のトンネル効果

2002 小柴昌俊

天体物理学と宇宙ニュートリノ



朝永・湯川 特別展示会

2006/3/25 ~ 5/7
国立科学博物館

2006/5/13 ~ 7/17
つくばエキスポセンター

2006/7/24 ~ 8/31
筑波大学総合交流会館

2006/10 ~ 2007/1 京都大
学

2007/3 大阪大学



朝永振一郎生誕
100年記念
朝永振一郎博士生誕100年記念事業

朝永振一郎



写真：菊池俊吉氏撮影

朝永振一郎・湯川秀樹 生誕100年記念
特別展示

素粒子の世界を拓く



写真：京都大学基礎物理学研究所 所蔵

湯川秀樹

湯川博士は、1935年に、陽子や中性子を強く結びつけて原子核を作る方が、それまでに見つかったいない粒子（中間子）により媒介されるとする理論を発表しました。第二次大戦後にこの新しい粒子、ハイ中間子、が実験で発見され、1949年に日本人として初めてのノーベル賞を受賞しました。

2006年5月13日(土)~ 7月17日(月) 10:00-17:00
(月曜、5/30、6/27~30 休館)

つくばエキスポセンター

TXつくばはエクスプレス つくば駅A2出口より徒歩5分 入場料：有料、駐車場あり（有料）
詳細は <http://www.expocenter.or.jp> TEL：029-858-1100

2006年7月24日(月)~ 8月31日(木) 9:00-16:00
(土・日・祝日も開館)

筑波大学 総合交流会館

TXつくばはエクスプレス つくばは駅下車
つくばセンターよりバス 筑波大学循環（右回り）7分 大学会館前下車、入場料：無料





筑波大学
University of Tsukuba

[主催] 筑波大学 [共催] 財団法人つくば科学万博記念財団 [協力] 京都大学、大阪大学、国立科学博物館
[後援] 財団法人仁科記念財団、日本物理学会、つくば市・つくば市教育委員会、茨城県・茨城県教育委員会
お問い合わせ： 029-853-2024 (筑波大学 総務課) <http://tomonaga.tsukuba.ac.jp/>



朝永振一郎博士 生誕100年記念

「科学の芽」賞 募集。

主催 筑波大学 後援 毎日新聞社 / 時事通信社 / 日本教育新聞社 / 日本物理学会 / 日本物理教育学会
日本科学教育学会 / 日本理科教育学会



募集作品 この言葉にあるように、君たち自身が自然現象の不思議を発見し、観察・実験を行ったり、考えたことをまとめたもの。完成された作品にかぎらず、素直な疑問・発見があるものが望ましい。

募集期間 2006年
8月1日火～9月15日金
[必着のこと]

提出方法 レポート用紙(A4判)10枚以内
応募作品は原則として返却しない。返却を希望する場合には、返信用封筒(切手を貼付)を同封のこと。
詳細は、筑波大学ホームページ又は下記の問い合わせ先へ照会のこと。

応募資格 小学校3学年～中学校、高等学校、盲・養護学校の個人もしくは団体。
小学生部門、中学生部門、高校生部門に分けて公募する。

審査結果発表 平成18年11月中旬
筑波大学ホームページに掲載。受賞者本人に通知。

発表会・表彰式 平成18年12月23日[土] 於、筑波大学大会館

送付先
〒112-0012 東京都文京区大塚 3-29-1
筑波大学附属学校教育局「科学の芽」賞 実行委員会

問い合わせ先
筑波大学附属学校教育局総務課 電話 03-3942-6804
E-mail: kagakuume@sec.tsukuba.ac.jp

ふしぎだと思いうこと
これが科学の芽です
よく観察してたしかめそして考えること
これが科学の茎です
そうして最後になぞがとける
これが科学の花です

朝永振一郎

(朝永振一郎先生生誕100年記念)



PROFILE
朝永振一郎先生 略歴
1906年 東京に生まれる
1941年 東京理科大学
(現、筑波大学)教授
1948年 中のみ理高。
1949年 東京教育大学
(現、筑波大学)教授
1956～1962年 東京教育大学長
1965年 第一物理学会会長
1968年 東京教育大学名誉教授
1979年 逝去

写真:朝永振一郎氏撮影

Illustration: MORIBI MURANO design: STUDIO-MY

「科学の芽」賞

SHINICHIRO TOMONAGA

ふしぎだと思ふこと

これが科学の芽です

よく観察してたしかめ

そして考へること

これが科学の茎です

そして最後になぞがとける

これが科学の花です

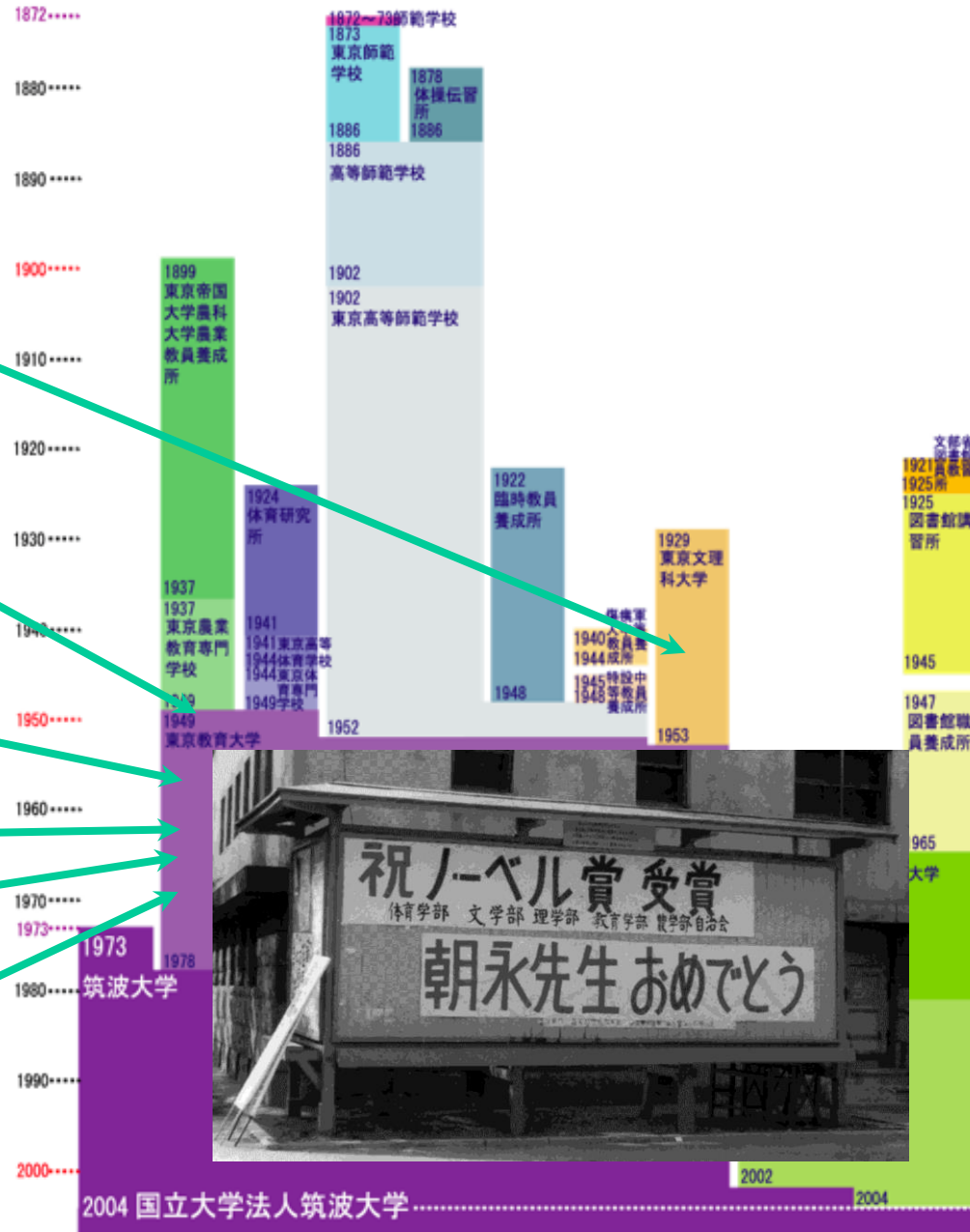
朝永振一郎

朝永博士と筑波大学

- 1906年(明治39年)3月31日 東京生まれ
- 1929年 京都大学 卒業
- 1932年 理化学研究所 仁科研究室
- 1937年 ドイツに留学
- 1941年 東京文科大学(現:筑波大学)教授
- 1943年 超多時間理論を発表
- 1948年 くりこみ理論を完成
- 1949年 東京教育大学(現:筑波大学)教授
集団運動の理論
- 1956年~1962年 東京教育大学長
- 1963年~1969年 日本学術会議会長,
東京教育大学附属光学研究所長
- 1965年 ノーベル物理学賞受賞
- 1969年 東京教育大学を定年退官, 名誉教授
- 1979年(昭和54年)7月8日 逝去

その間、多くの物理学者を育てた。

筑波大学の沿革



素粒子物理学の歴史

1950

20c半ば：1947年の π 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： ν_e 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： ν_μ 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= **素粒子標準理論(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： τ の発見 (M. Perl)

1976年： $\bar{\nu}_\mu e \rightarrow \bar{\nu}_\mu e$ の発見 (Gargamelle Group)

1977年： $\Upsilon(b\bar{b})$ の発見= b クォークの発見 (L. Lederman)

1980

1980年：グルオンジェットの発見 (at PETRA)

素粒子と素粒子間の力(素粒子標準理論)

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 ν_e	ミューニュートリノ ν_μ	タウニュートリノ ν_τ	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)

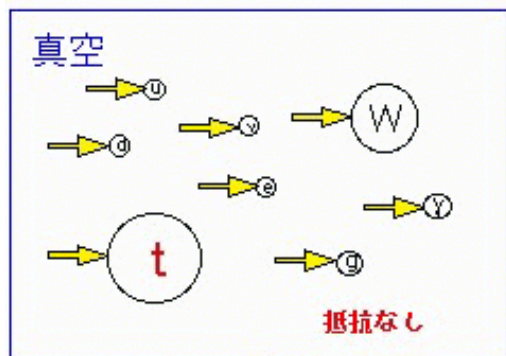
弱い力

W粒子(80)

Z粒子(91)

()内の数字はGeVの
単位で書かれた質量。
1 GeV = 10⁹電子ボルト

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

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

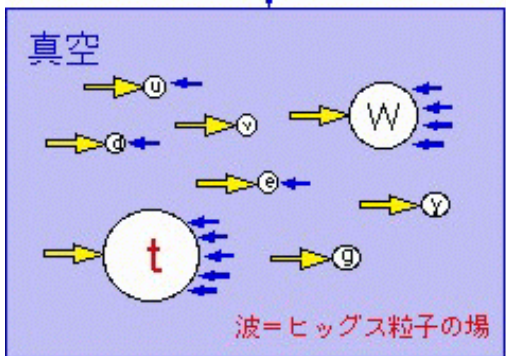
$\mu^2 > 0$ (ビッグバン直後)

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

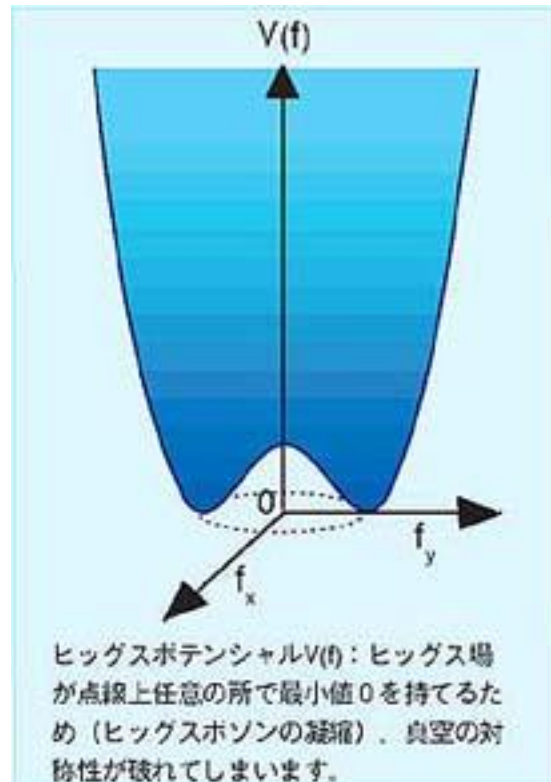
真空にはヒッグスが充滿している!

粒子を加速しようとする、ヒッグスにぶつかる。

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

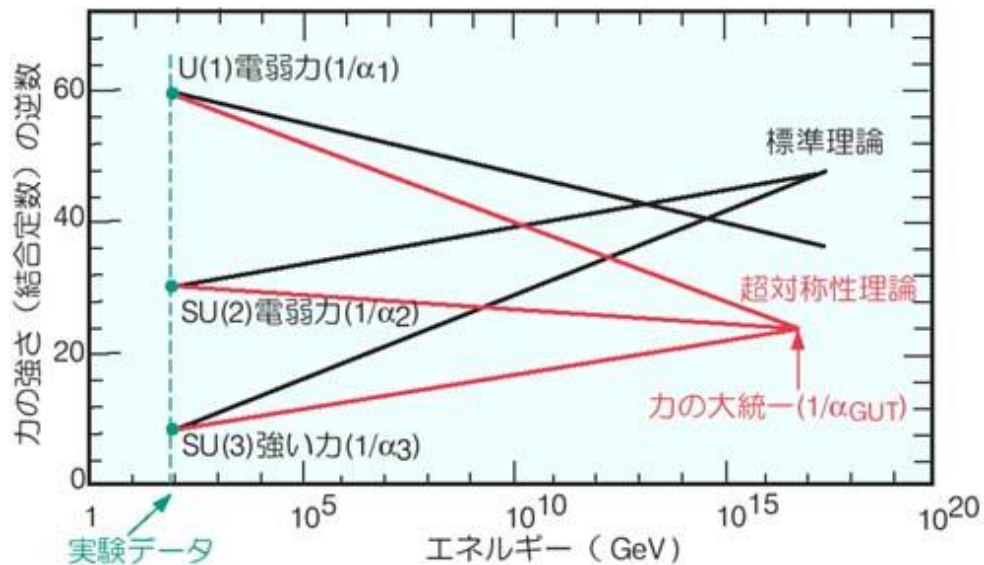
ぶつかりやすいほど重い!

→ 力 → 抵抗



大統一理論

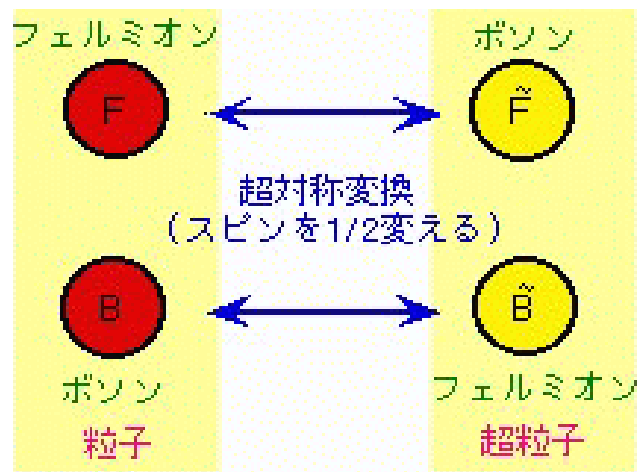
三つの力(電磁力、弱い力、強い力)は、宇宙創生直後の高温時には対称性が成り立ち、同一の力であった。それが冷えてきたときに対称性が破れて異なる力に見えるようになった。



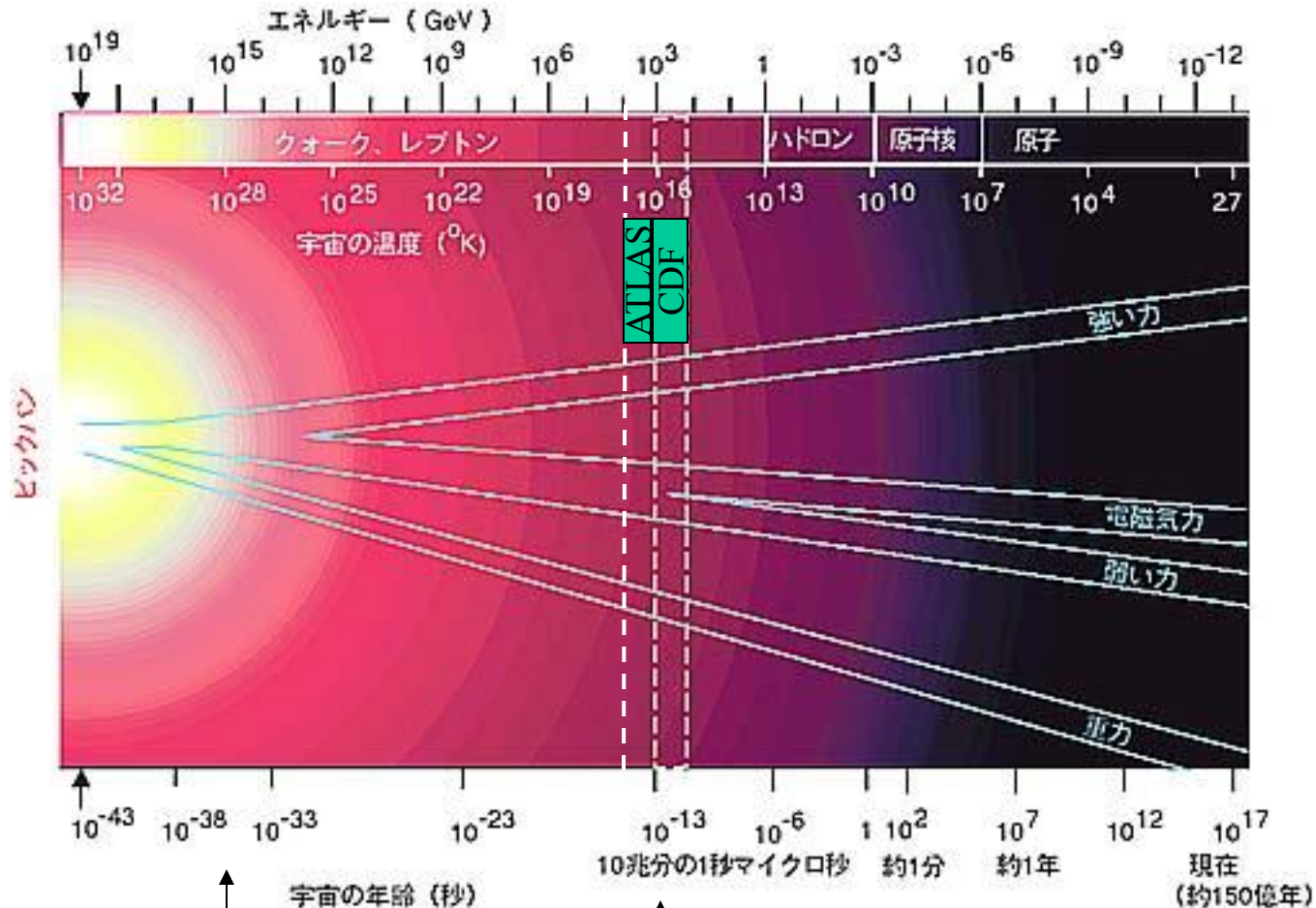
超対称性理論

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、 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

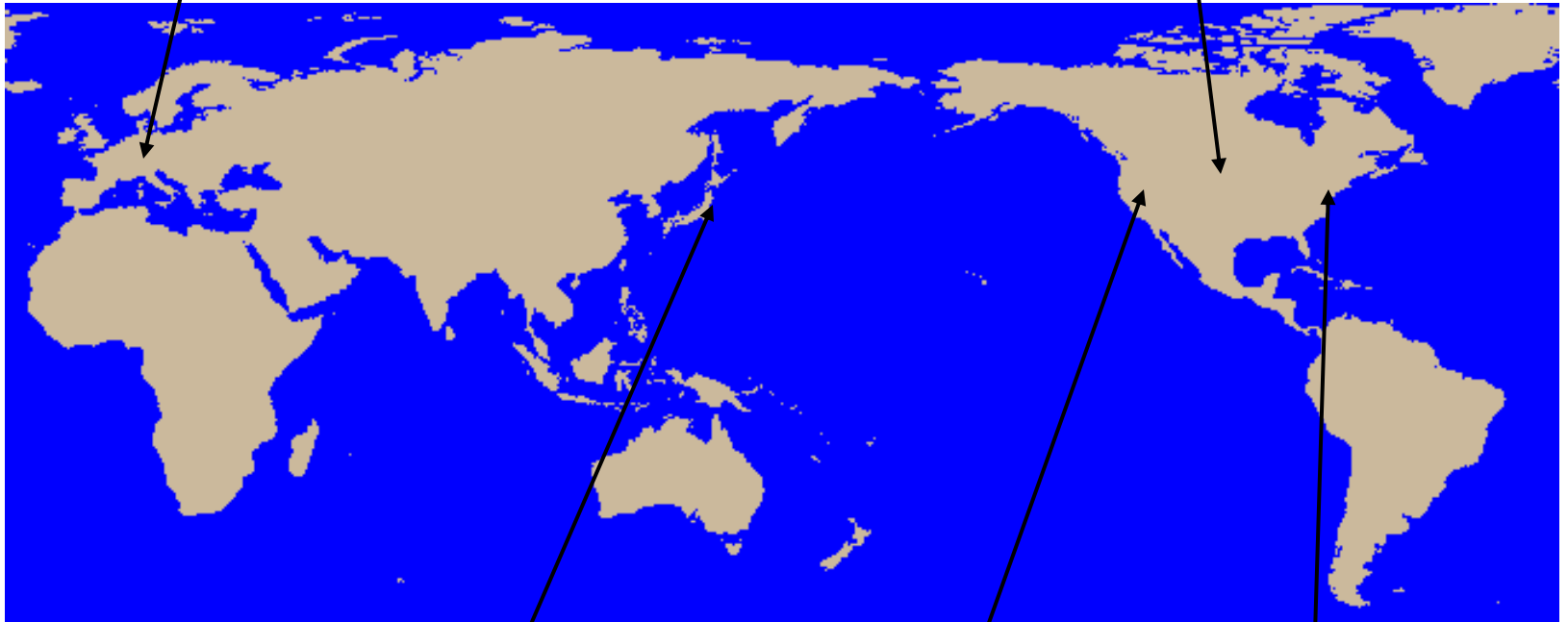
真空の相転移
粒子反粒子対称性の破れ

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

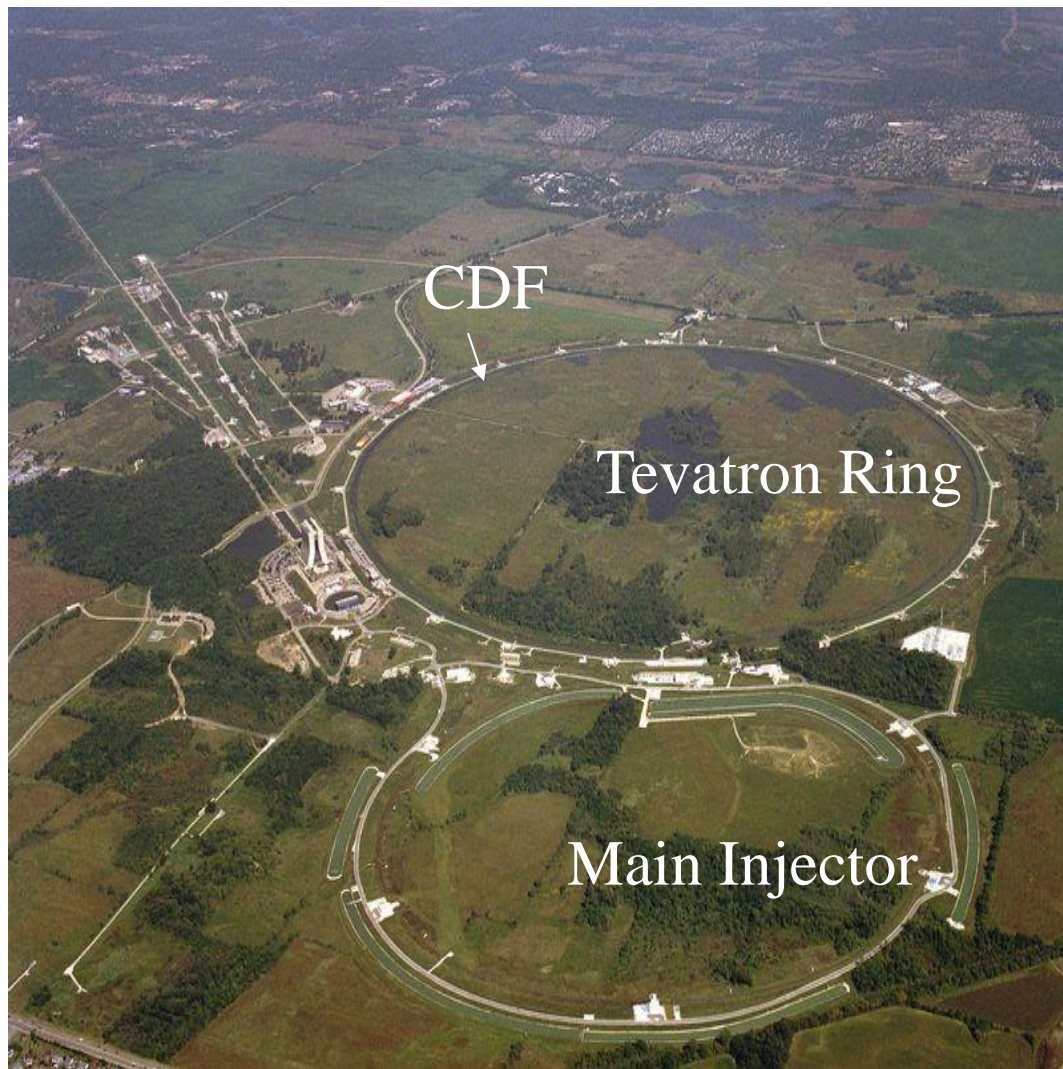


高エネルギー加速器研究機構(日本) KEK

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



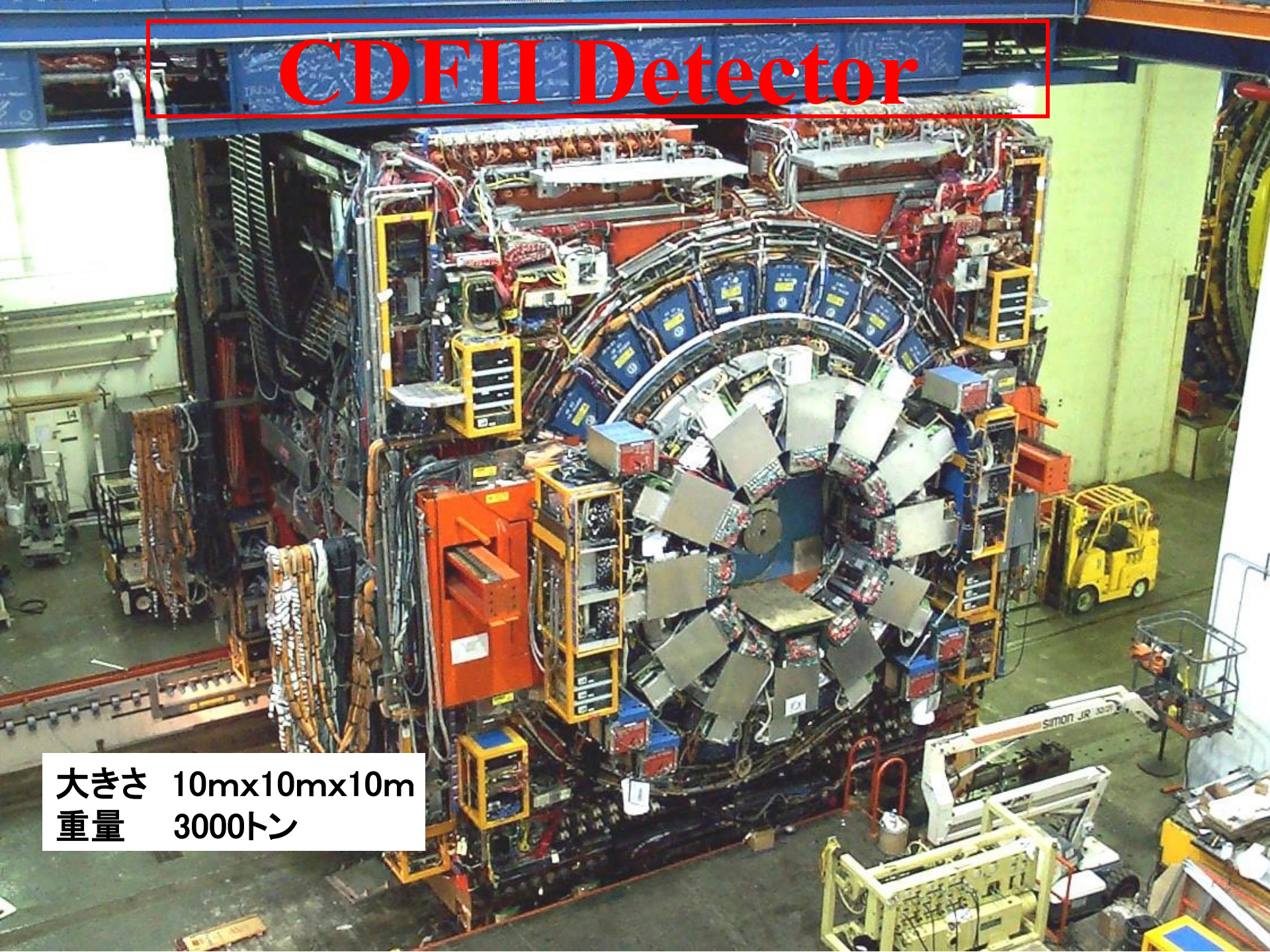
米国シカゴ郊外の研究所。

直径2kmの加速器。

陽子反陽子衝突エネルギーが
2TeV(2×10^{12} 電子ボルト)

CDFII Detector

大きさ 10m×10m×10m
重量 3000トン





New

Old

Partially
New

Muon System

Central Calor.

Solenoid

Plug Calor.

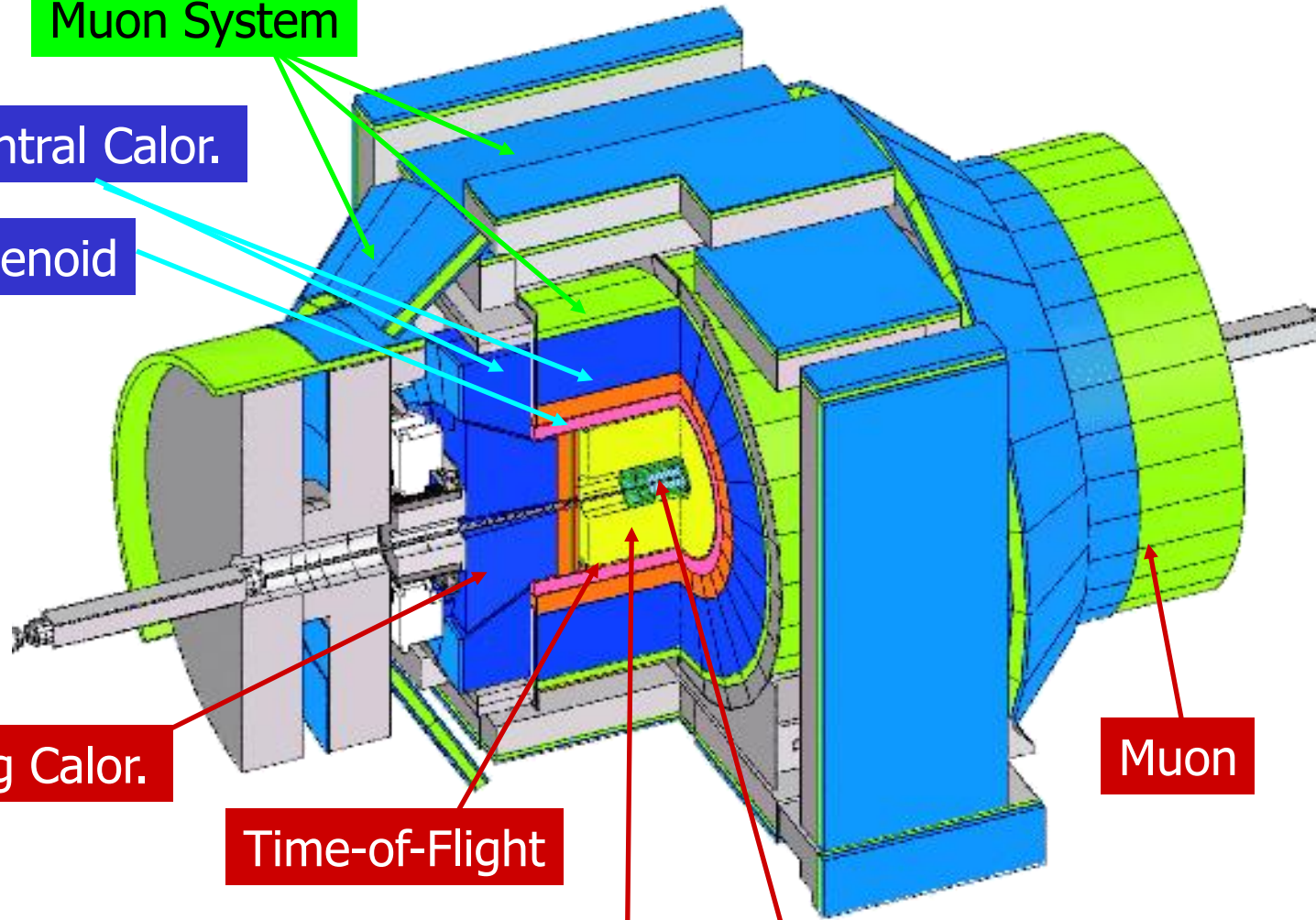
Time-of-Flight

Drift Chamber

Silicon Microstrip
Tracker

Muon

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



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
(日米伊87名)
- 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 (7カ国445名)
- 1994年 **トックオーク発見**
- 1998年 **B_c 中間子発見**
- 2001年4月~ 物理実験(Run2)再開
(12カ国600名)
- 2005年 **ヒッグス粒子の質量上限決定**
- 2006年 **B_s 中間子の粒子反粒子振動
の発見**



トップクォーク候補事象の一例

e + 4 jet event

40758_44414

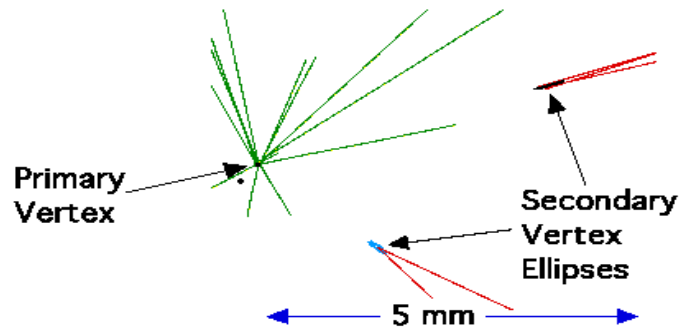
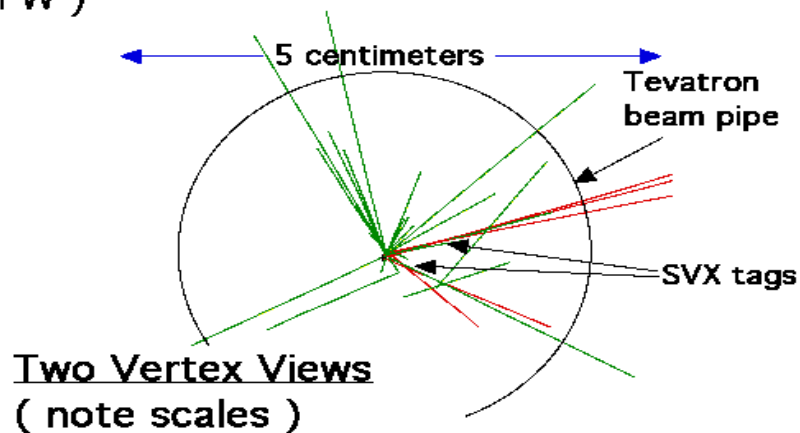
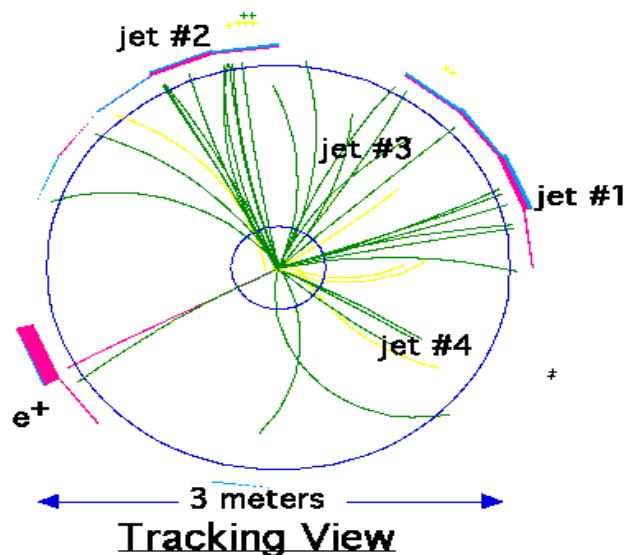
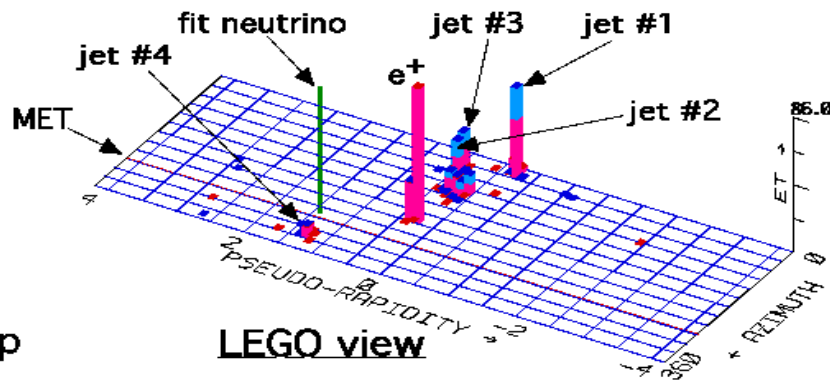
24-September, 1992

TWO jets tagged by SVX

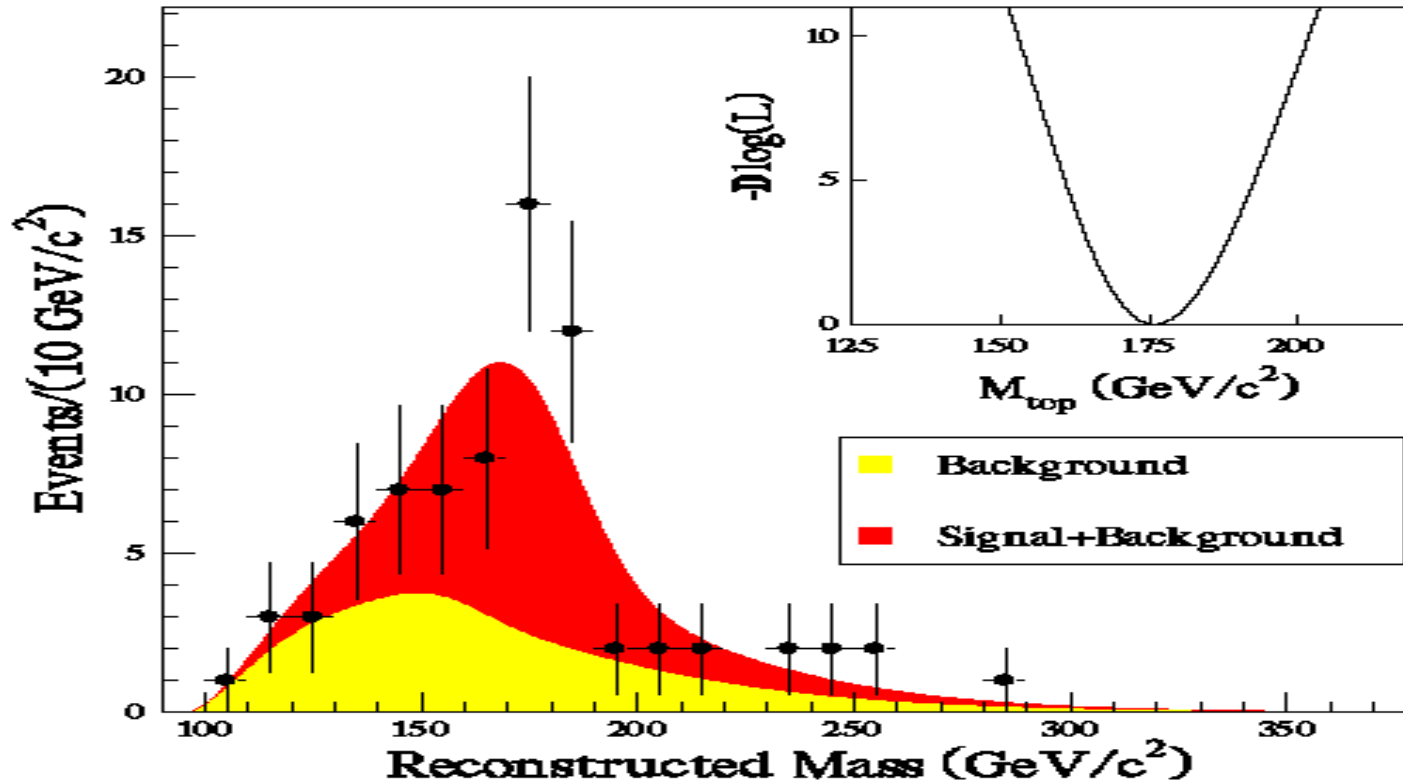
fit top mass is 170 ± 10 GeV

e^+ , Missing E_T , jet #4 from top

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



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)



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

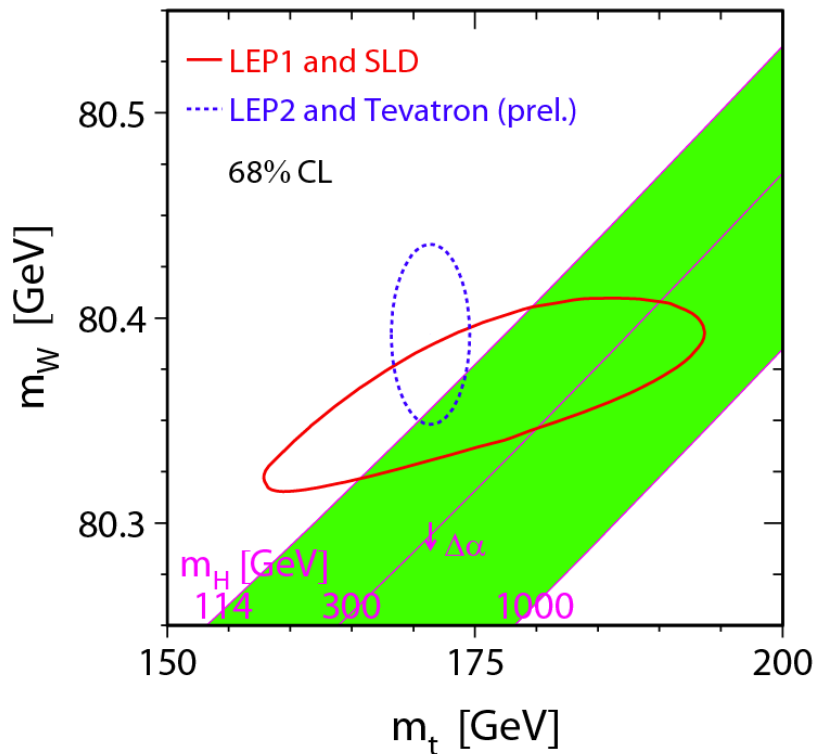
Combined CDF results (all channels)

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

Combined Tevatron results (CDF + D0)

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

トップクォーク質量測定による ヒッグス粒子の間接探索



質量の輻射補正計算より, ヒッグス粒子の質量はトップクォークの質量とWボソンの質量に左図のように関係づけられる。
トップとWの質量測定→ヒッグスの質量決定

テバトロン実験: 世界最高エネルギー
2TeVの陽子反陽子衝突による
トップクォーク対生成 $p\bar{p} \rightarrow t\bar{t}X$
(唯一のトップファクトリー)

2006年夏 テバトロン実験の結果:

トップクォークの質量: $M_{\text{top}} = 170.9 \pm 2.4 \text{ GeV}/c^2$

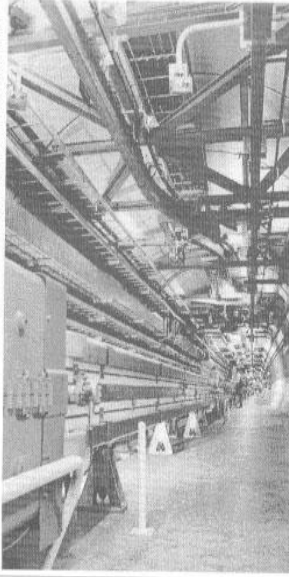
ヒッグス粒子の質量: $114 \text{ GeV}/c^2 < M_{\text{Higgs}} < 166 \text{ GeV}/c^2$

重さの正体つかまえる

物には重さがある。当たり前のようだが、物理学的に説明しようとするところが難しい。質量のかきまわりの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所(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つて、「標準理論」を検証するだけでなく、「大統一理論」など新たな神秘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つきまわら。

カギ握る粒子「ヒッグス」 欧州チーム「存在示唆」

物質は原子が集まり、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、私たちの世界は、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、不思議なことにはこれらの粒子の質量はゼロでなければならぬ。



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・ジュネーブの園地にある(CERN提供)

ヒッグス粒子探索 についての記事

ぶつつかって、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。未知の粒子は説明者にちなみ「ヒッグス」と呼ばれる。米国のフェルミ国立加速器研究所の加速器パイプライン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、質量を与えられた粒子になった。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。残った一種類が「見えるヒッグス」。自然では、高いエネルギーを持つ陽子同士が衝突するようなまれな場合にしか現れない。人工的につくるには非常に高

いエネルギーが要る。八〇年代、ヒッグスを探る大規模計画が登壇した。米国のSSC(二四八七億)とCERNのLHC(四二七億)。計画では、いずれもトンネル内で陽子同士を衝突させ、十兆電子ボルトを超えるエネルギーをぶつける。SSCは建設費が巨額で中止になった。LHCは建設費を二千億円で抑え、二〇〇五年の運転開始を目指している。

だ、あと二カ月実験できれば、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ければ、今月末で終わる予定だったが、今回の結果を待たず、十一月二日まで約一カ月の延長が決まった。それはすでに確定できるから、それは「微妙なところ」(駒宮さん)。

既存の加速器にチャンス

とらが最近、一兆電子ボルトとされていたヒッグスの質量が、千五百億〜二千五百億電子ボルトへ下方修正された。これならCERNの運転中の加速器LEPや、デパトロン能力でも見つかるとも考えられる。

慎重な見方をする。「観測したのは、ヒッグスが崩壊したときみられる約五通りのパターンのうち二通りだけ。残りの三パターン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」

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。私たちの世界にある四つの力のうち電磁力と「弱い力」を統一した標準理論は検証されたことになる。さらに「物理学的次の枠組みも見えてく」と駒宮さん。

「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」

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二つ「アレーフ」がこれほど、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

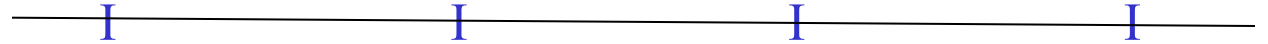
対称性)が重要な柱の一つ。超対称性を課すと大統一理論は、質量千五百億電子ボルト以下の「軽いヒッグス」の存在を言っている。「見えるヒッグス」がそれである可能性もある。正体がわかってくれば、大統一理論の入り口に立つことになる」と金さん。

ただ、これらの理論につなげるには、ヒッグスを見つけてからでは不十分だ。性質を見極める必要がある

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。

超高エネルギー衝突実験の現状と計画

2000年 2005年 2010年 2015年



テバトロン陽子反陽子
衝突実験 (FNAL, 米国)
2TeV



$M_H < 180 \text{ GeV}/c^2$ ならばヒッグス粒子検出
(95%信頼度)

LEP電子陽電子衝突実験
(CERN, ヨーロッパ)
206GeV



$M_H = 115 \text{ GeV}/c^2$?
(99%信頼度)

LHC陽子陽子衝突実験
(CERN, ヨーロッパ)
14TeV



$M_H < 1 \text{ TeV}/c^2$ ならばヒッグス粒子検出
超対称性粒子も存在すれば検出

LC電子陽電子衝突実験
(建設地未定)
500GeV- 1TeV



$M_H < 0.9 \text{ TeV}/c^2$ ならばヒッグス粒子検出
超対称性粒子も存在すれば検出

LHC 陽子陽子衝突実験

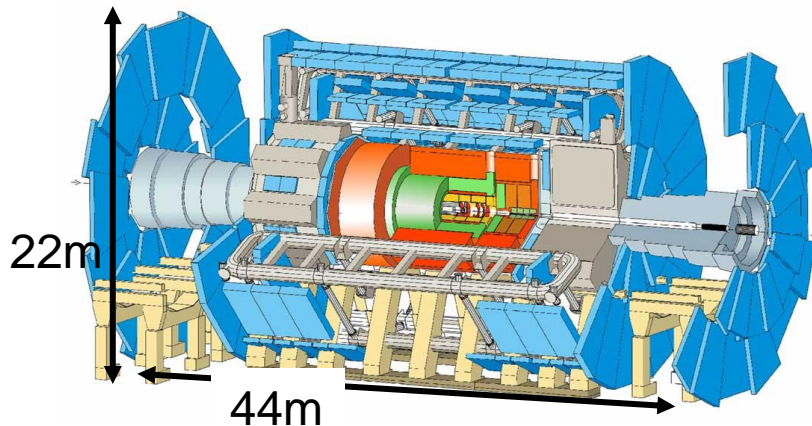


LHC (Large Hadron Collider):

スイス・ジュネーブのCERN研究所の陽子陽子衝突型加速器。衝突エネルギー14TeV (14×10^{12} 電子ボルト)。加速器の大きさは直径約8km。

2008年春から本格実験開始。

実験目的: ヒッグス粒子の発見とその性質の研究



ATLAS測定器:

LHC加速器の陽子陽子衝突点に置かれて、衝突で出てくる粒子を検出し、そのエネルギーを測る。

素粒子実験研究室

メンバー

教官 7名

教授 2名、講師 3名、助手 1名、研究員 1名

学生 23名

後期博士課程大学院生 10名

前期博士課程大学院生 9名

学類四年生 4名

学生の研究テーマ

前期博士課程大学院生・学類四年生：検出器の開発研究

後期博士課程大学院生

1年次 物理解析の準備を開始

1～2年次 フェルミ研究所あるいはCERN研究所に滞在し、データ収集を行い、共同研究者とミーティング等での議論を通じて解析方針をつめる。

3年次：論文の仕上げ。

検出器の開発・物理解析の経過報告のため、外国人共同研究者とともに日米欧間でTV会議システムを用いた発表討論が常時行われている。

学生の博士号取得

過去10年間に20名が博士号取得。

理工学群物理学類

研究分野

理論：素粒子，宇宙，原子核，物性
実験：素粒子，宇宙，原子核，物性，プラズマ

WEBページ

物理学系

<http://www.px.tsukuba.ac.jp/>

理工学群物理学類

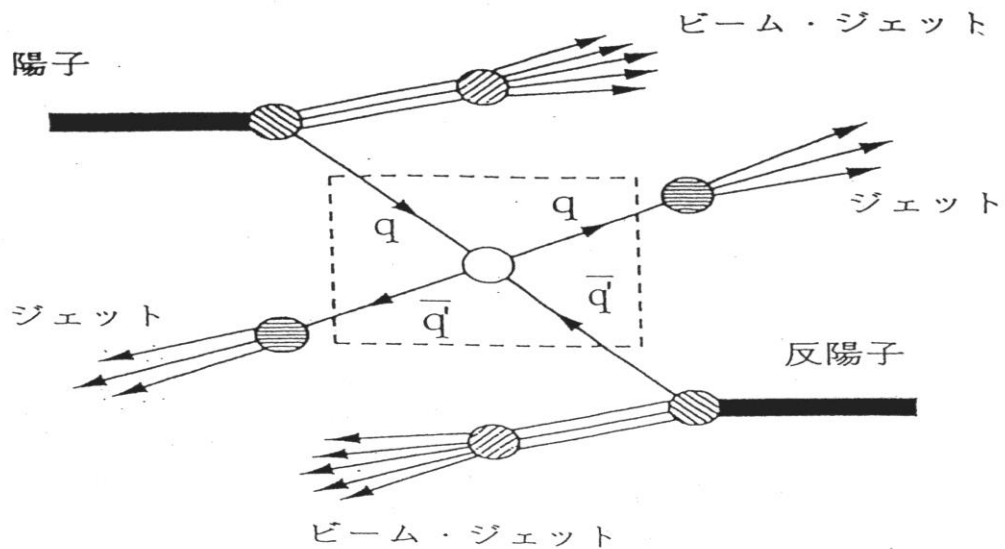
<http://www.butsumi.tsukuba.ac.jp/>

素粒子実験研究室

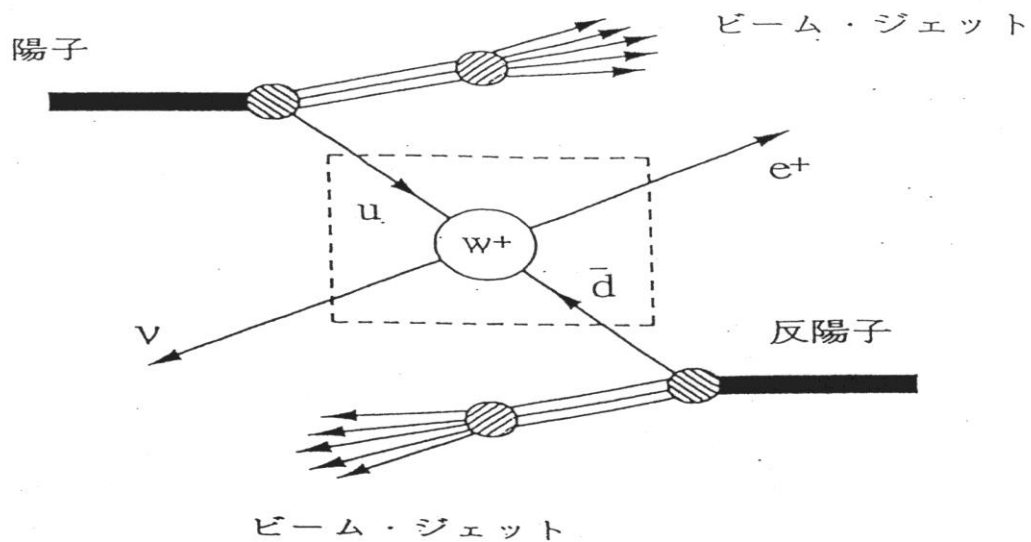
<http://hep-www.px.tsukuba.ac.jp/>

BACKUP

(a)



(b)



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)

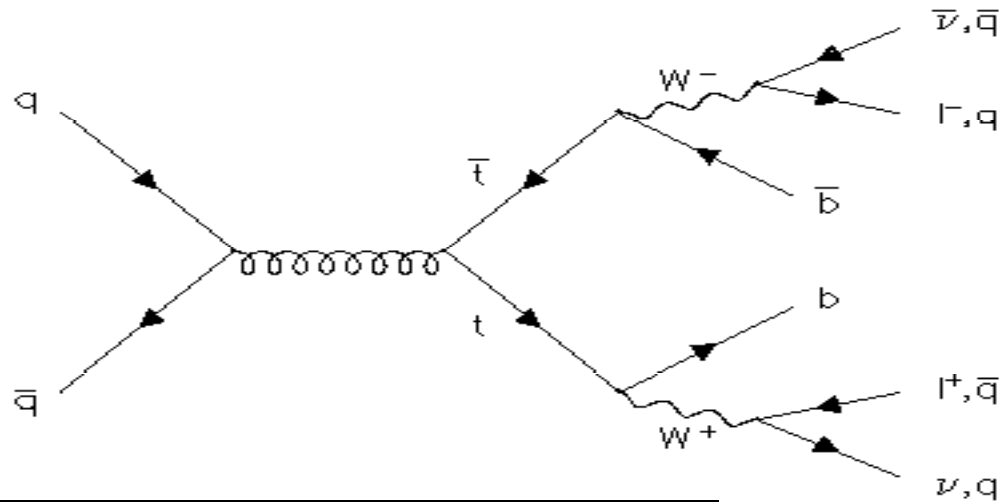
1987年～1995年

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: $l^\pm, \text{missing ET}, \gamma 3 \text{ jets}, b \text{ tagging}$

● Multi-Jets (All Hadronic)チャンネル

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

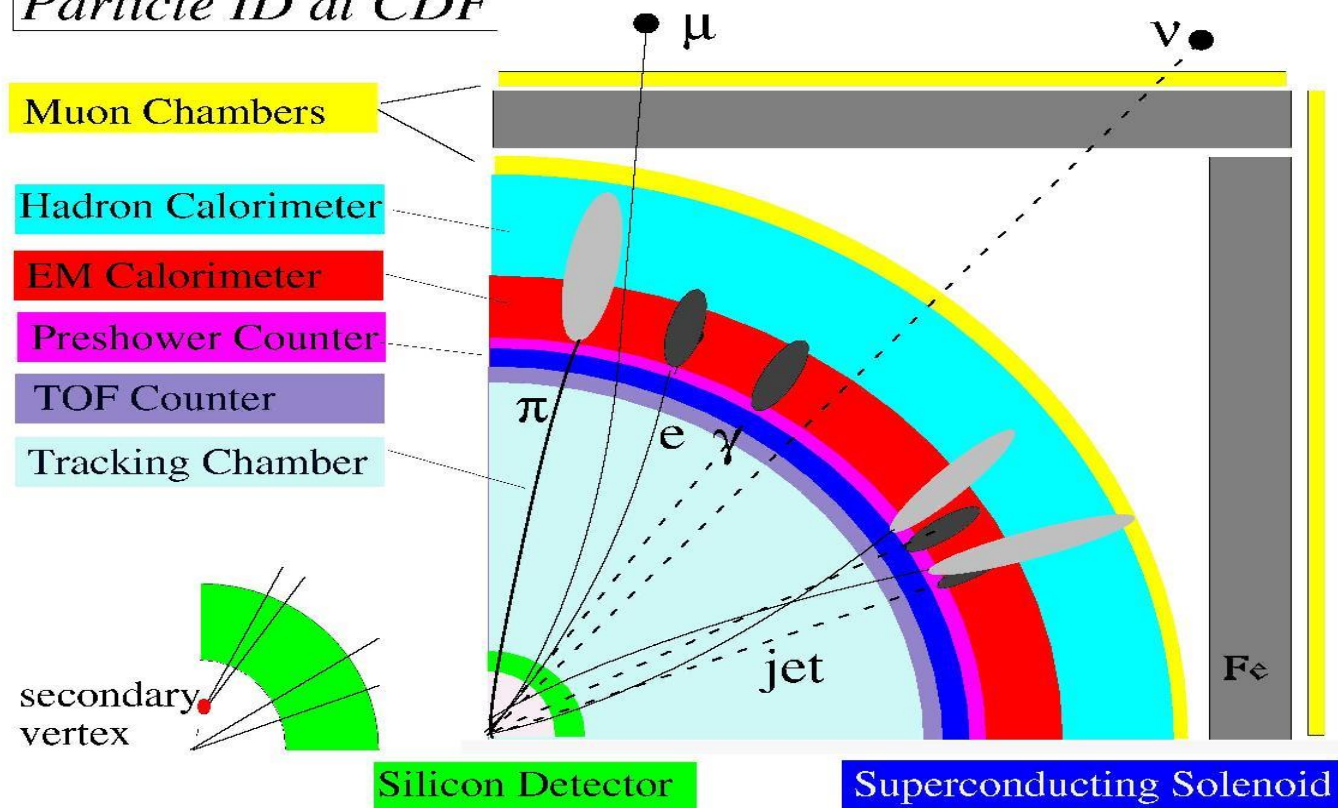
事象選別の信号: $\gamma 5 \text{ jets}, \Sigma \text{ ET}, b \text{ tagging}$

b tagging:

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

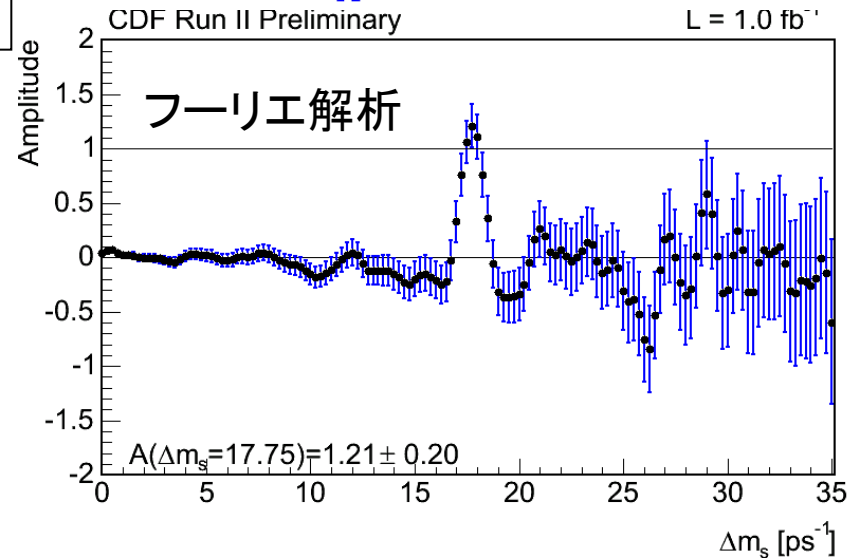
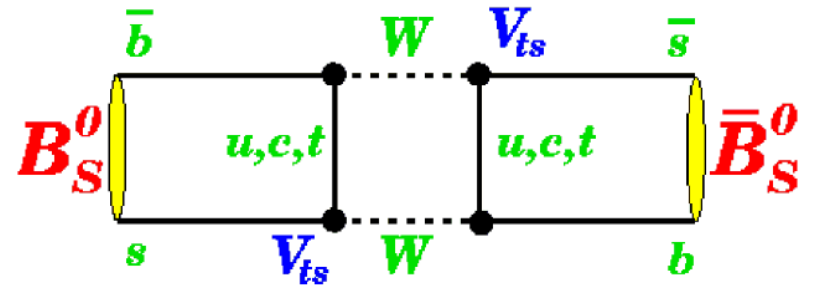
◎ b 崩壊から来る低 p_T の soft lepton を検出 (SLT)。

Particle ID at CDF



B_s 中間子の粒子反粒子振動の観測

電荷を持たない中性の粒子では、粒子と反粒子が生成される際の状態と崩壊する際の量子力学的な固有状態が異なる。固有状態の質量に差があると、質量差 Δm の振動数で粒子反粒子振動が起きる。これまで K , B 中間子でのみ粒子反粒子振動が観測されていた。



B_s 中間子の粒子反粒子振動の角振動数

$\Delta m_s = 17.77 \pm 0.10$ (統計誤差) ± 0.07 (系統誤差) 毎ピコ秒。(ピコ秒 = 10^{-12} 秒)

標準理論(小林益川理論)の非常に高い精度の検証。

A01の予想外の成果。

CDFの歴史 素粒子物理学の歴史

1980

1979年：CDF実験グループ結成

1981年：CDF実験設計報告書

1983年：W, Zボソンの発見

(UA1, UA2)

1985年：CDF実験で陽子・反陽子衝突を初観測

1987年：CDF実験開始(Engineering Run)

ジェット、Wの観測

1990

1988年：CDF実験Run 0(Physics Run)

～1989年 W, Zの質量、*b*クォーク生成断面積

1992年：CDF実験Run I

～1996年 1991年：軽い ν の世代数=3

(SLC, LEP)

1994年：トップクォークの発見

(CDF)

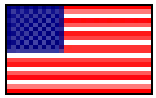
Wの質量、トップクォーク生成断面積と質量、*b*-ハドロンの質量と寿命

*B_c*中間子の発見(1998年)

2000

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

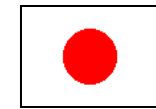


1 University



1 University

Asia



5 Universities
1 Research Lab



1 University



3 Universities

Totals

↗ 112 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)	参加国 : 3	人数 : 189名 (17)
米国	57名 (9)	米国	146名 (13)
イタリア	15名 (2)	イタリア	24名 (2)
日本	15名 (2) 17%	日本	19名 (2) 10%

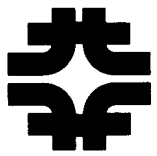
Run 1 (1998年時点)

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

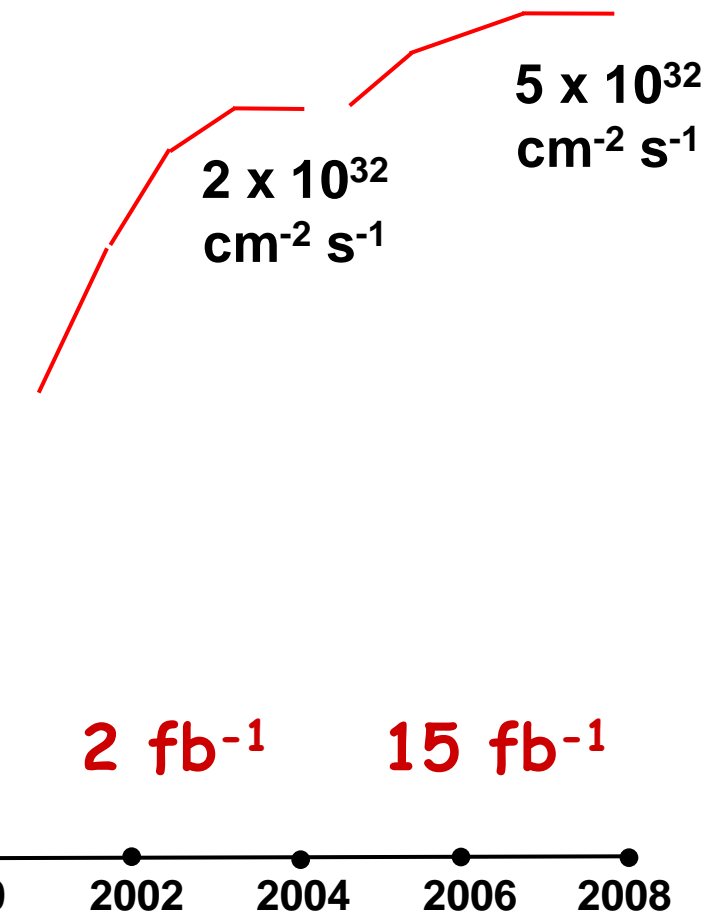
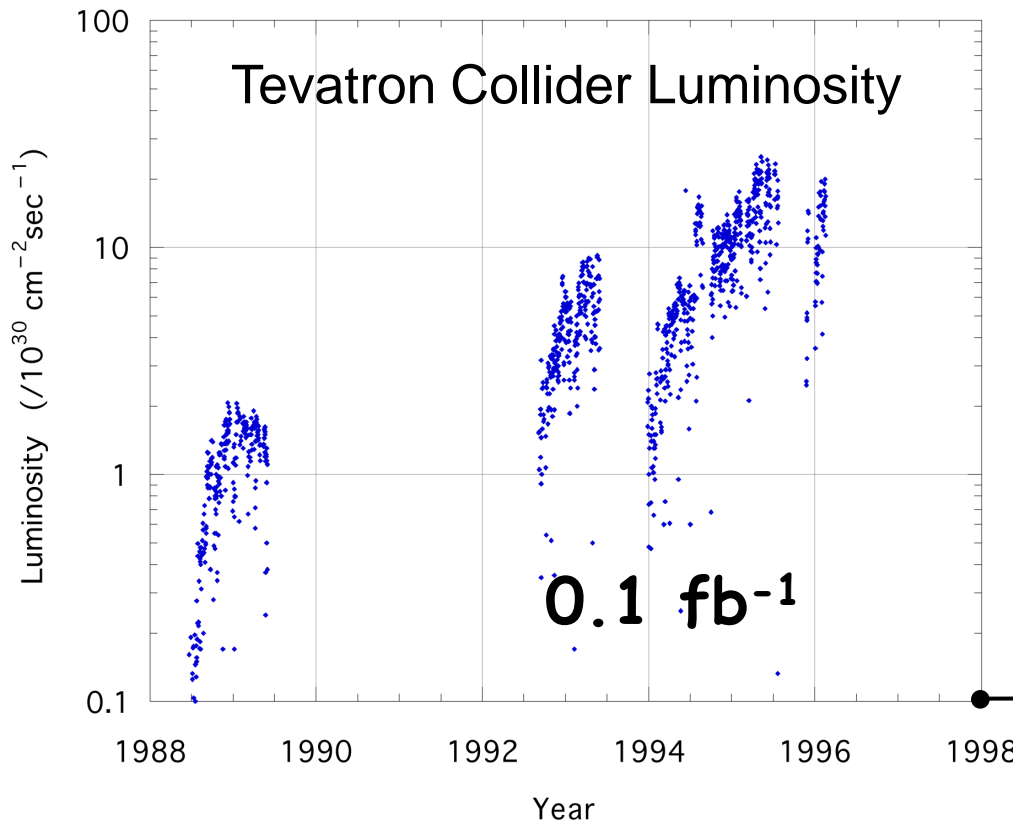
ITEP (ロシア)、Glasgow(英)、Oxford(英)、
College of London(英)、KHEL(韓国)、岡山大学 (日本)



Tevatron History and Future

Discovery of top, B_c , ...

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



Run : 0
 \sqrt{s} :

Ia Ib
 1.8 TeV

IIa IIb
 1.96 TeV

Tevatron status

Collider Run IIA Peak Luminosity

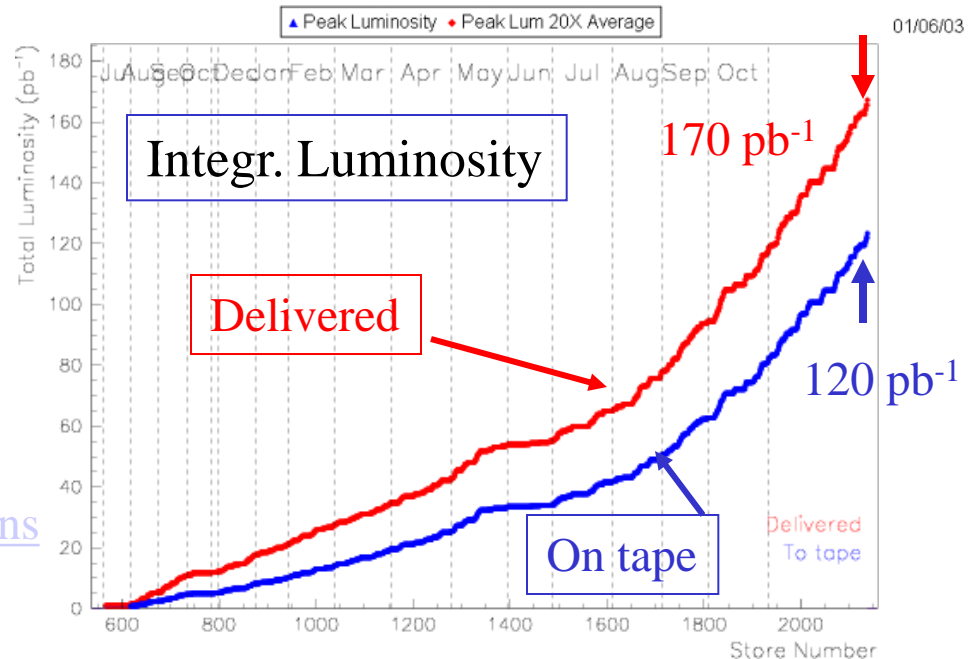
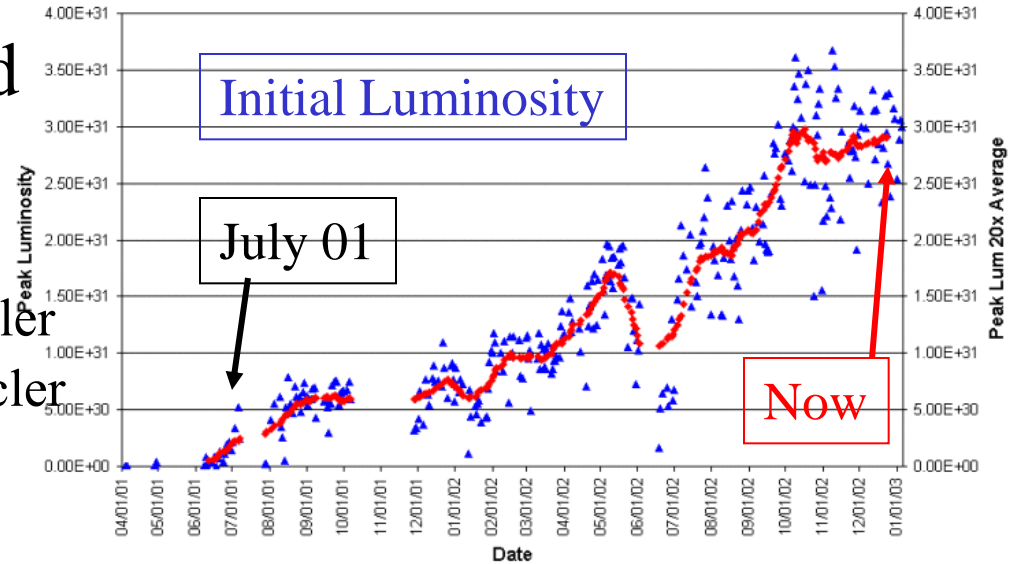
- Tevatron operations started in March 2001

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 pb^{-1} delivered until January '03
 - 120 pb^{-1} are on tape
 - $10 - 20 \text{ pb}^{-1}$ used for analyses shown here [\(details\)](#) [plans](#)



CDF実験設計報告書 (Design Report)

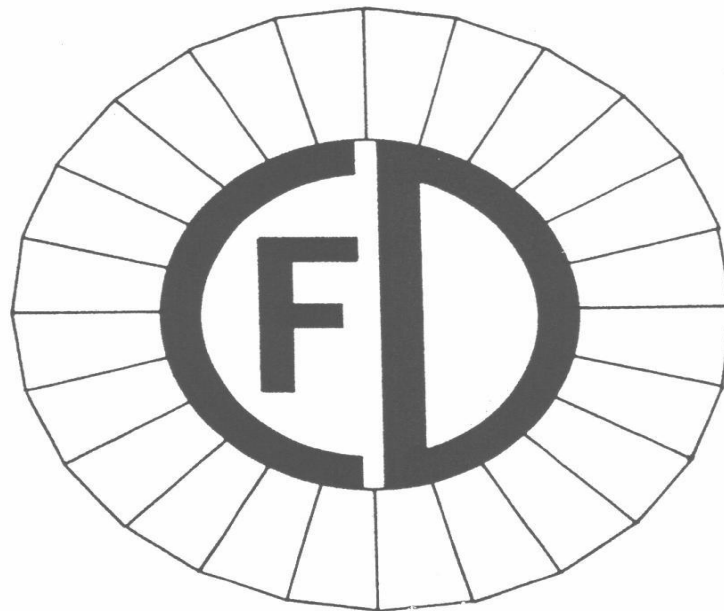
DESIGN REPORT

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

「トップ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.

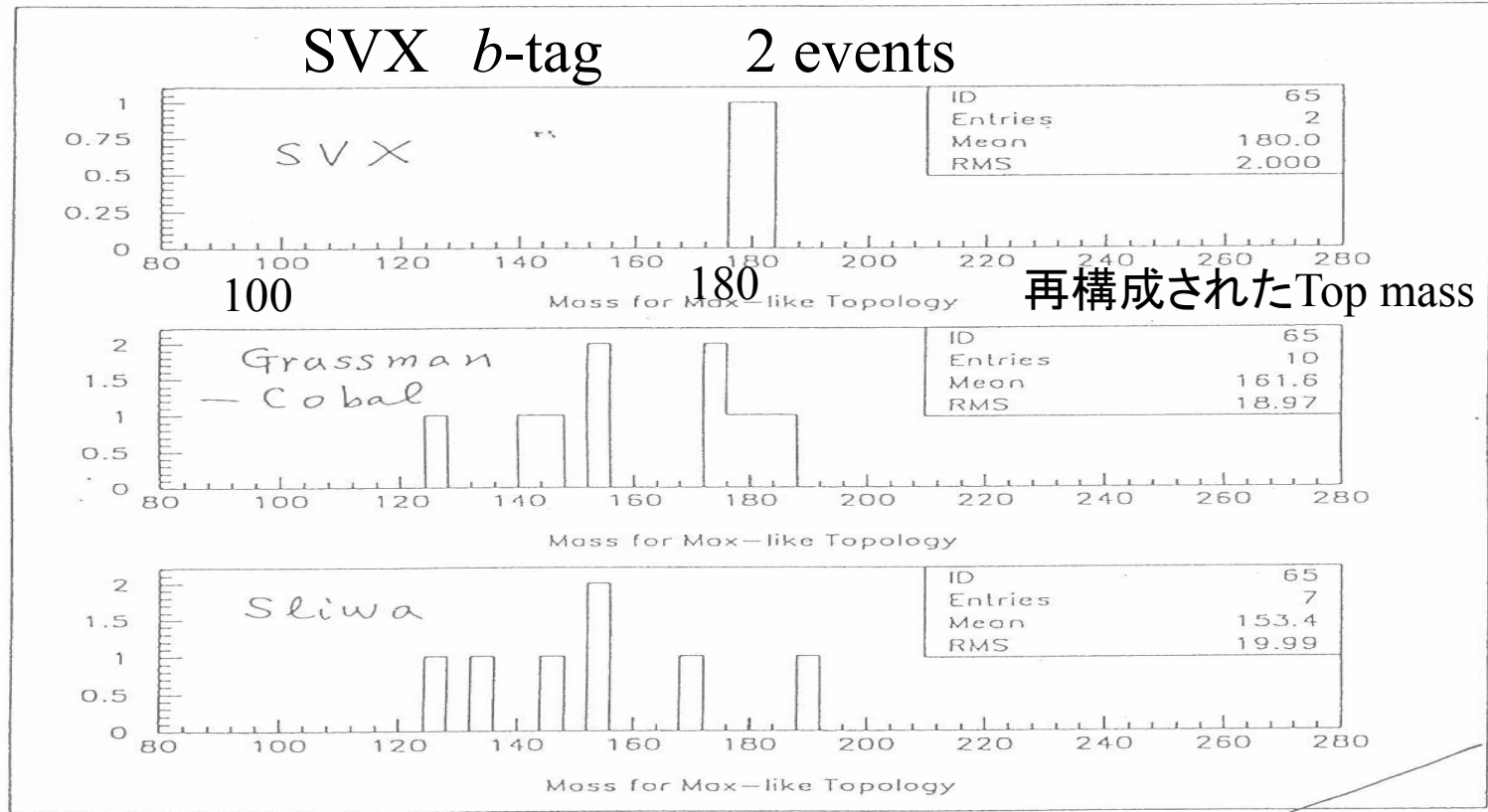
Muon Pt $> 20 \text{ GeV}$

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

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

< Overlaps with other event samples >

Mass for Maximum-Likelihood Topology



2/3

1: χ^2 cut

10/12

2: 4 jets cut

7/18

6: β_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 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



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**

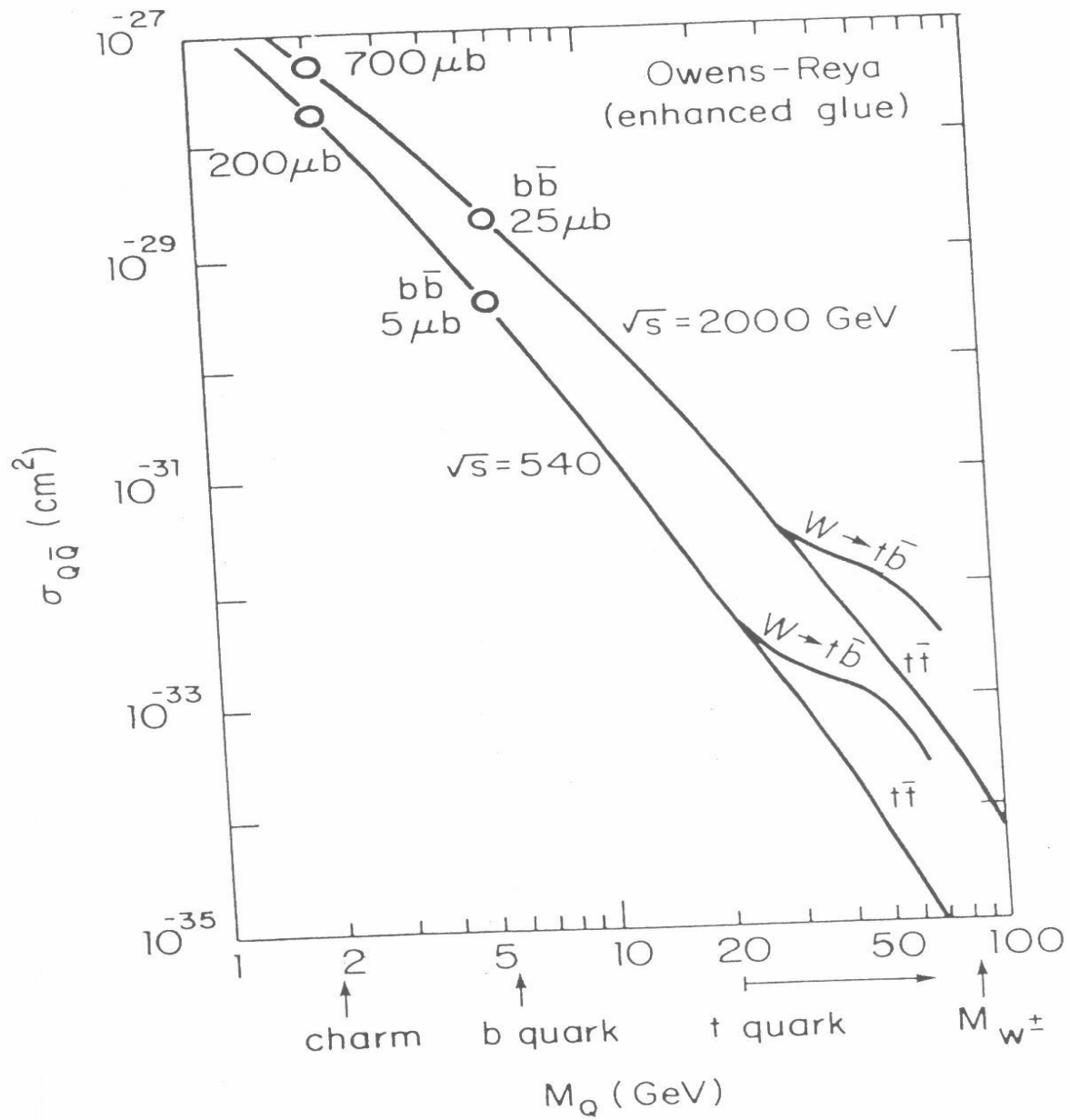


FIG. 1.8

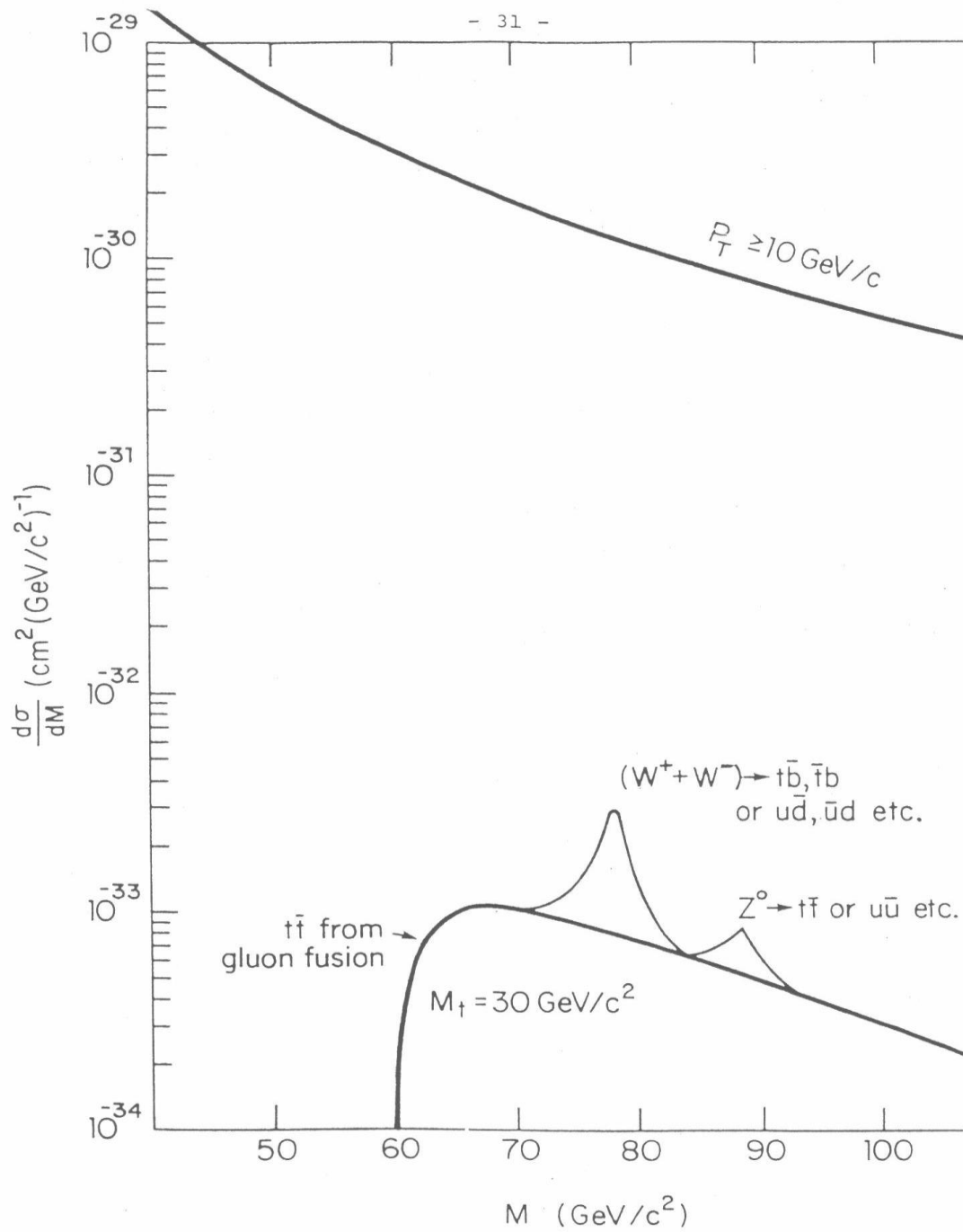
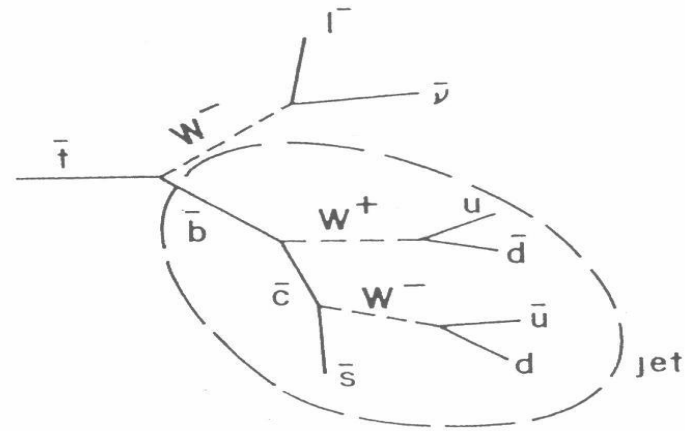
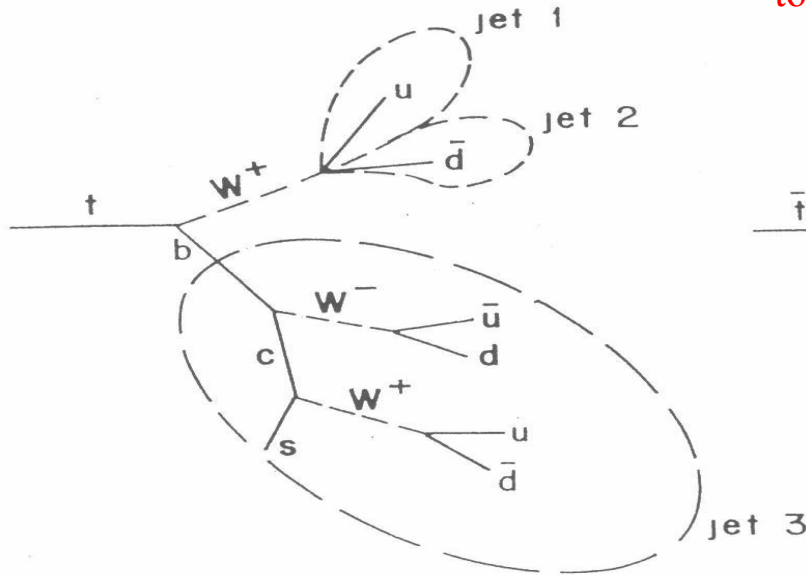


FIG 15

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

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



Leptononic W Decay

Hadronic 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} 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 1pb^{-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 100nb^{-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 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 $W \rightarrow t+b \rightarrow l+v+b+b$ 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 for 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) μ : muon chamber (c) Total: $\sum E_T > 40 \text{ GeV}$
Integrated Luminosity	136 nb^{-1} at $\sqrt{s} = 546 \text{ GeV}$	263 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) $\mu\nu\text{bb}$	3	
(3) $e\nu\text{bb}$	3	6

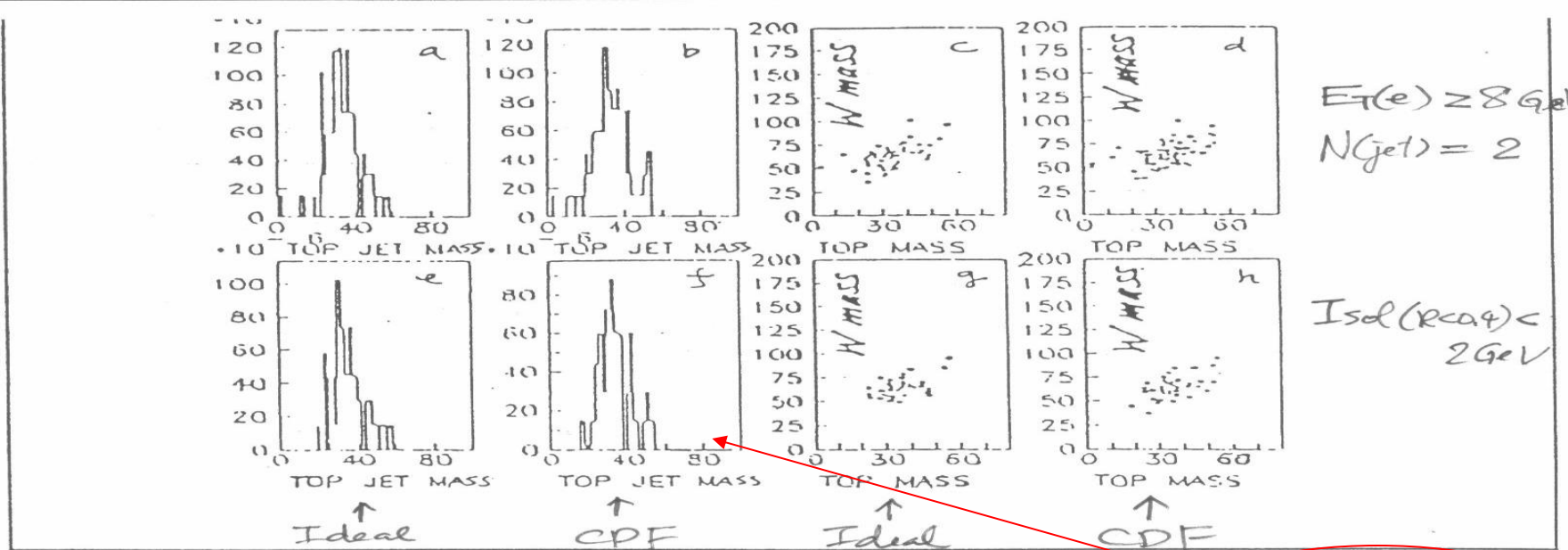


Figure 11 Same as Fig. 10 for top-quark signal sample with ODORICO.

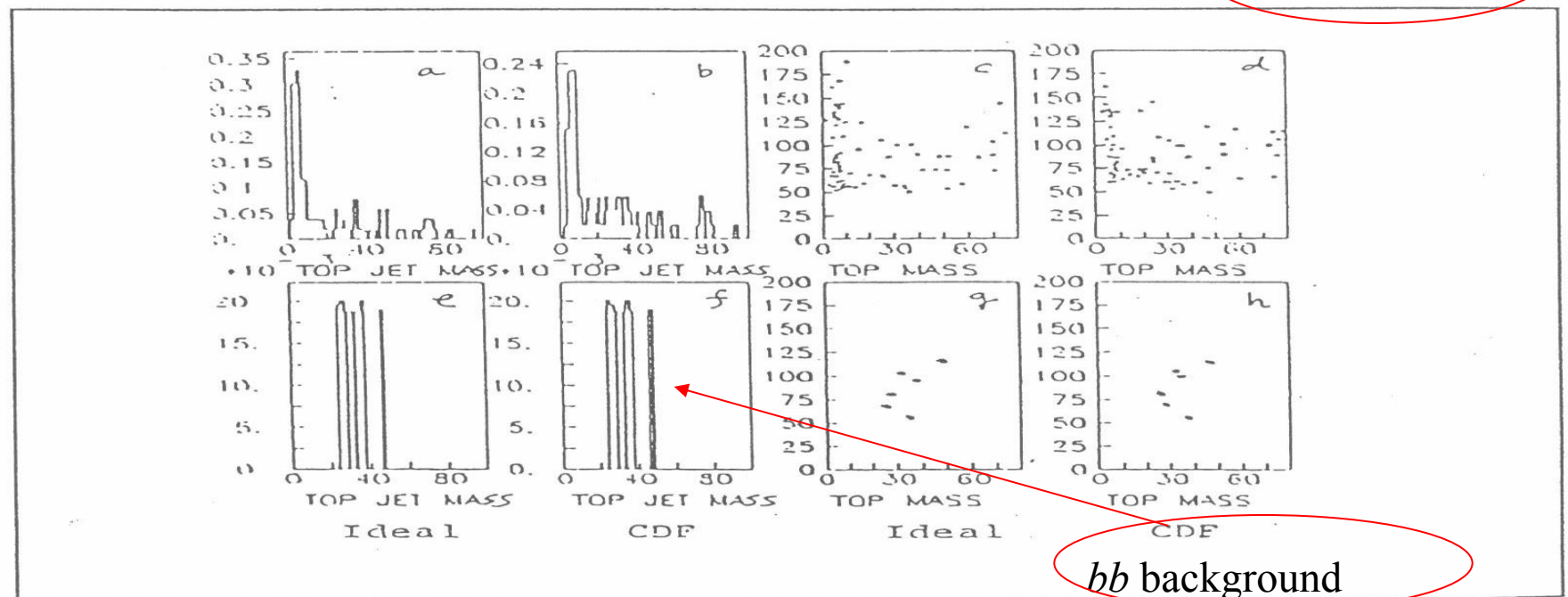


Figure 12 Same as Fig. 10 for bbX background sample with ODORICO.

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 $40 \text{ GeV}/c^2$.

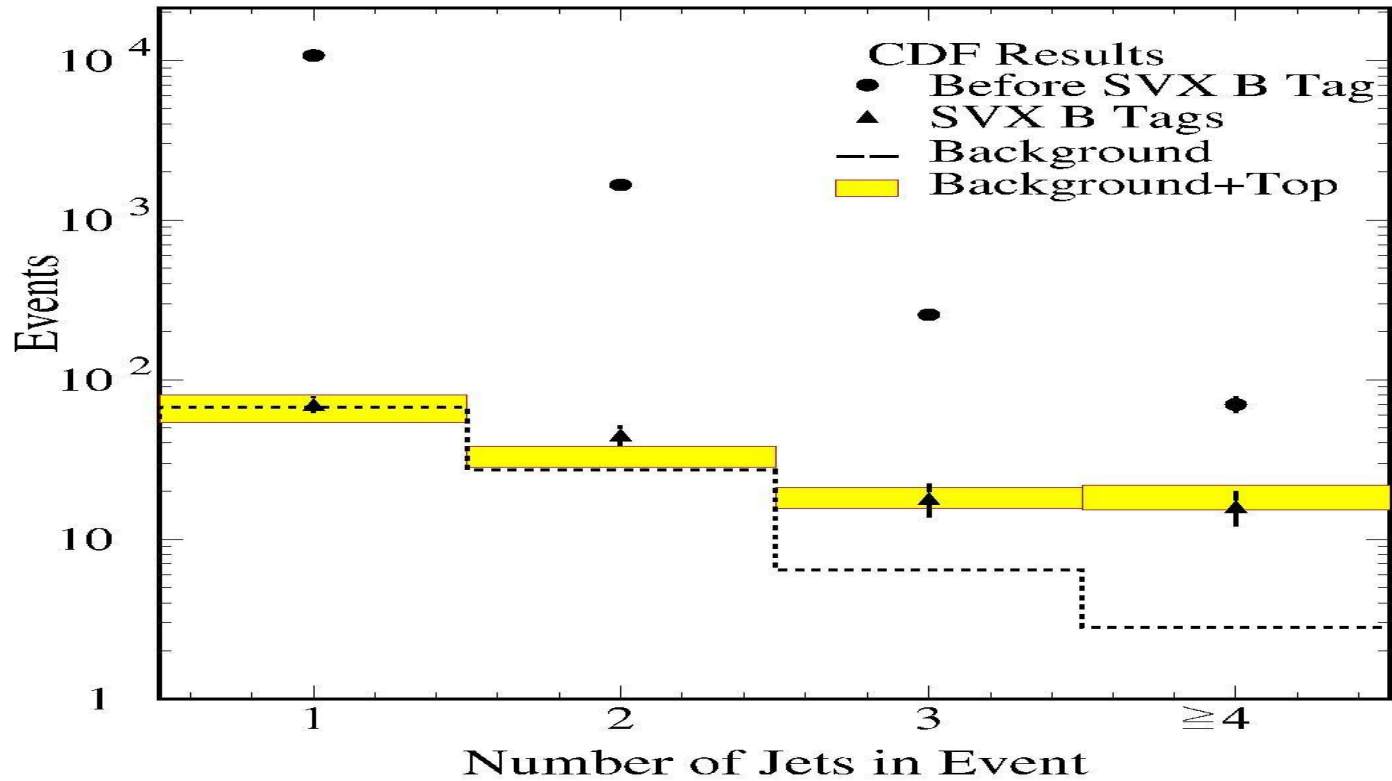
(3) The fraction of the correct combination for b_1 - and b_2 - quark jets was 54 % at $\sqrt{s} = 2$ TeV and 76 % at $\sqrt{s} = 540$ GeV. This is due to an existence of more hard recoil jets at the Tevatron energy than the SPS energy.

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。

$W(\rightarrow lv)$ +ジェット事象のジェット数分布



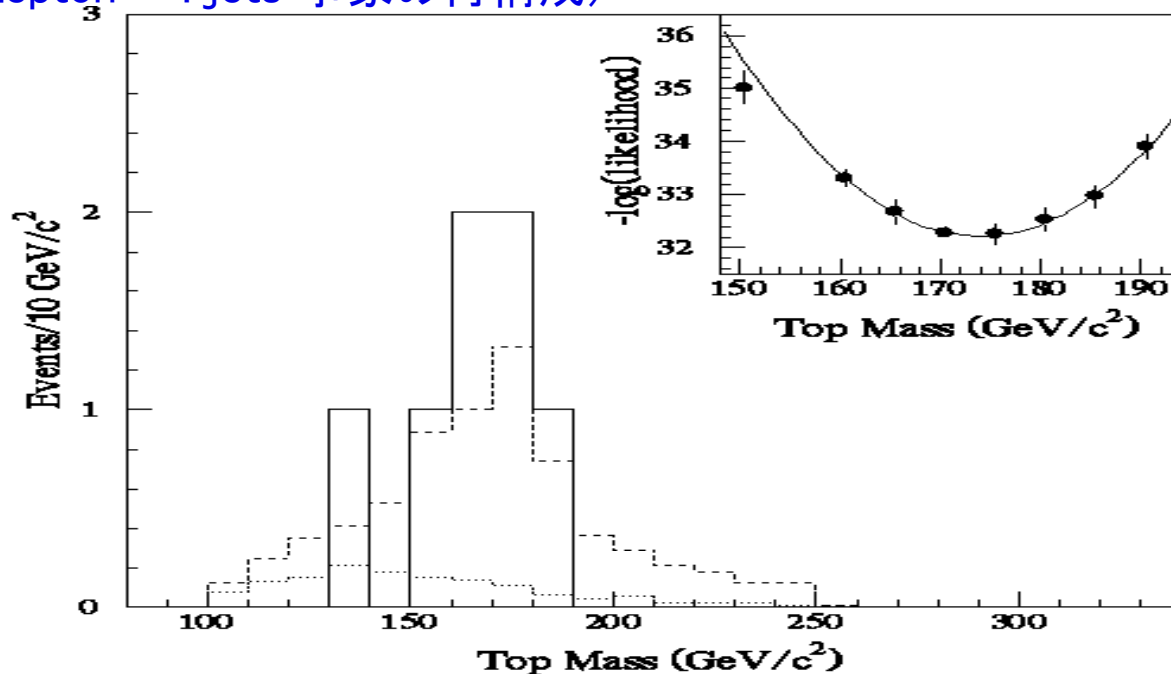
トップクォーク生成の証拠

Run 1A (1992-93, 19 pb⁻¹) 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: $P = 0.26\%$ (2.8σ)

質量分布 (Lepton + 4 jets 事象の再構成)



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

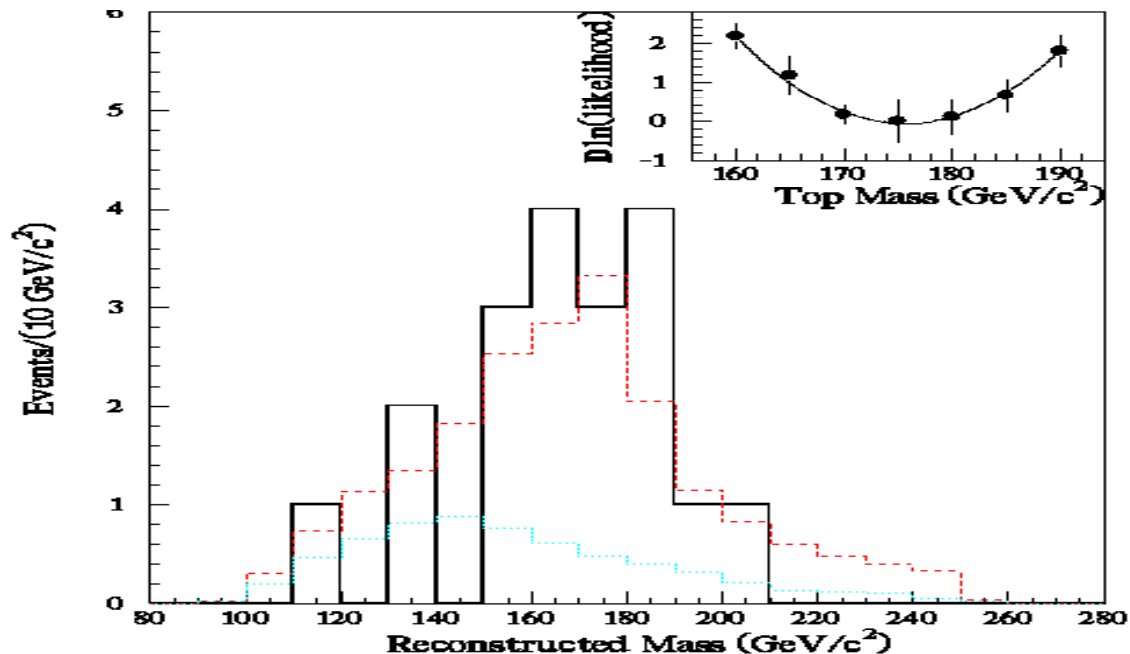
トップクォーク生成の確認

Run 1A +1B ; 67 pb⁻¹ 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 ⁻³ (2.7σ)
SVX	27 tags	6.7 ± 2.1	2x10 ⁻⁵ (4.0σ)
SLT	23 tags	15.4 ± 2.0	6x10 ⁻² (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⁻¹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

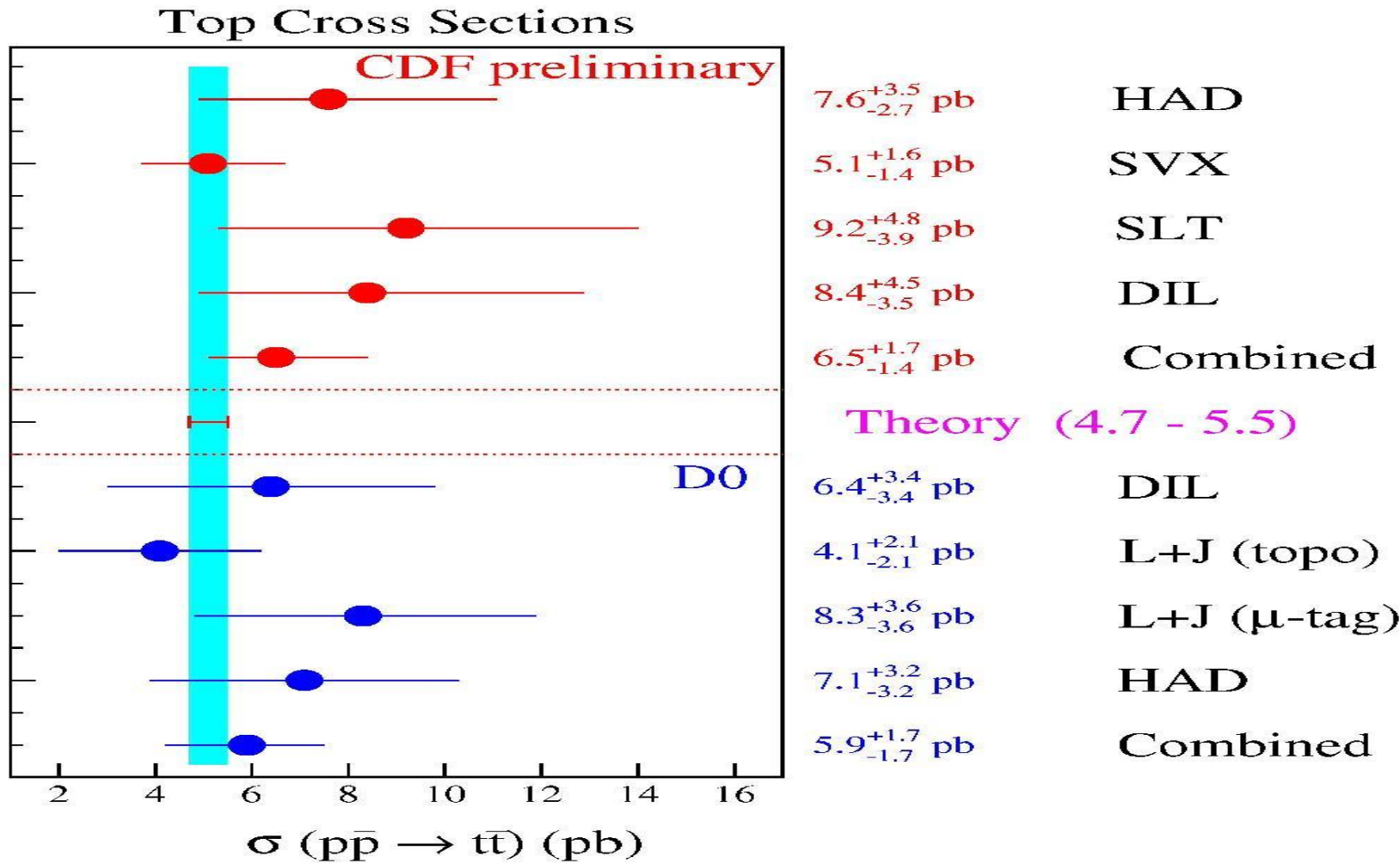
バックグラウンドの推定: 0.4 ± 0.1 事象

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 + ε 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。

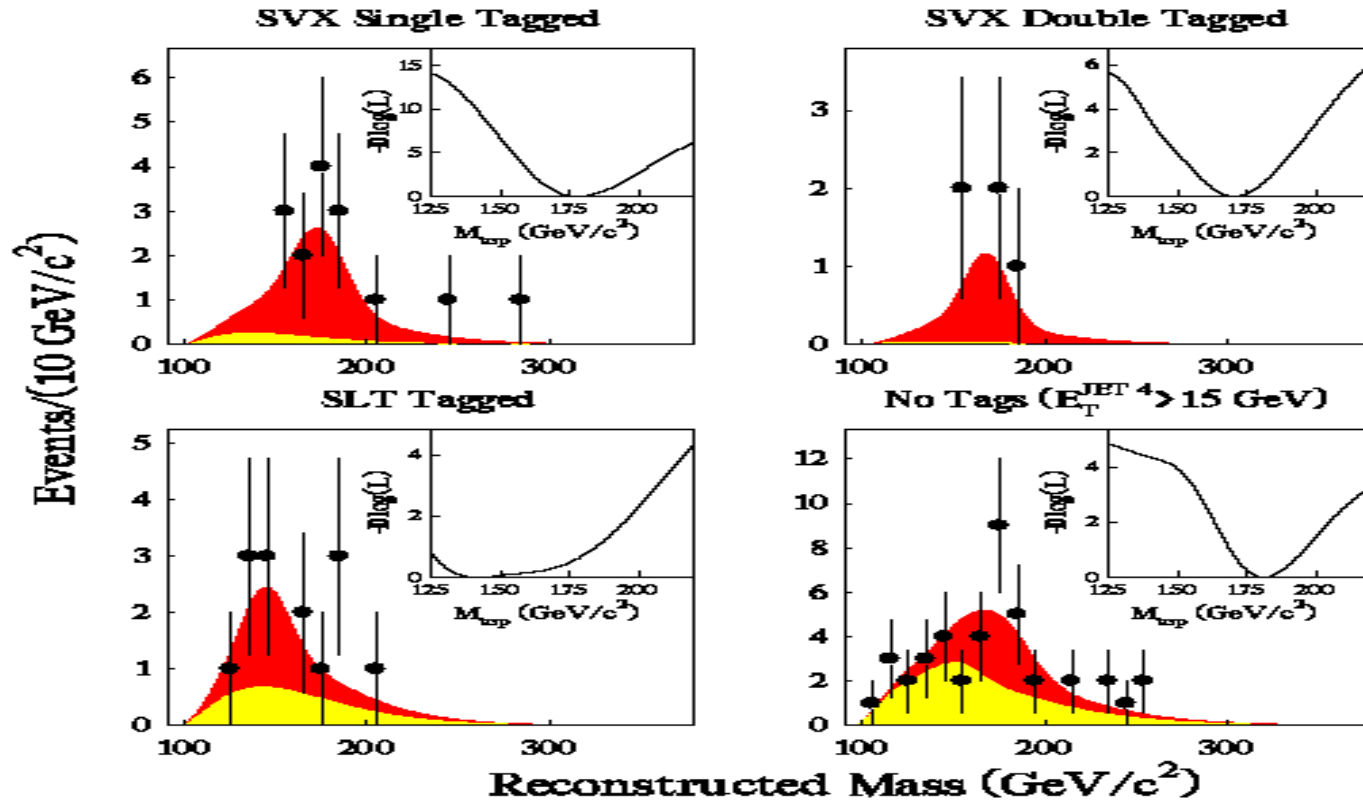
$P_z(\nu)$ の 2 つの解を試す。

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。 χ^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 ²)
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

(E_T(jet4) > 15GeV)

トップクォークの質量の系統誤差

	GeV/c ²	%
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/c² (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/c² (2.5%) と支配的である。

この不確定性の精度はレプトン+ ϵ 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。

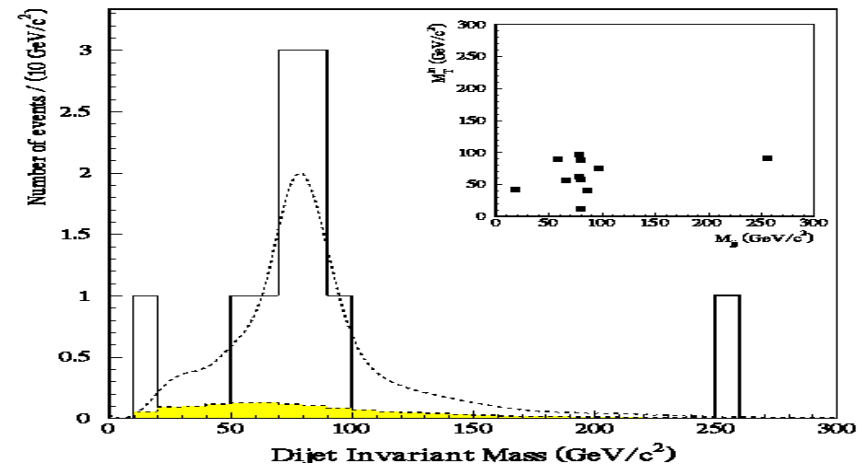
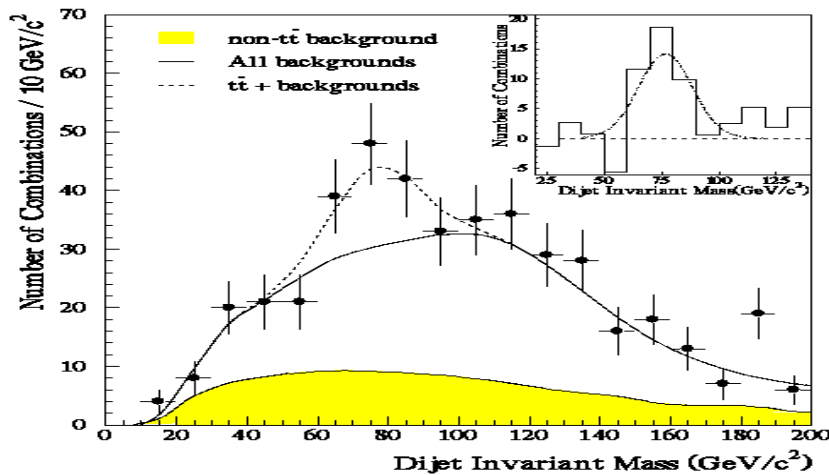
Wボソンのハドロン崩壊の観測 PRL('98)

レプトン+ ϵ 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

3.3σ (Prob= 5.4×10^{-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。

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}	
$u\bar{u}$ π^0, η, η'	$u\bar{d}$ π^+	$u\bar{s}$ K^+	$u\bar{c}$ \bar{D}^0	$u\bar{b}$ B^+	u
	$d\bar{d}$ π^0, η, η'	$d\bar{s}$ K^0	$d\bar{c}$ D^-	$d\bar{b}$ B^0	d
		$s\bar{s}$ η, η'	$s\bar{c}$ D_s^-	$s\bar{b}$ B_s	s
			$c\bar{c}$ J/ψ	$c\bar{b}$ B_c^+	c
				$b\bar{b}$ Υ	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

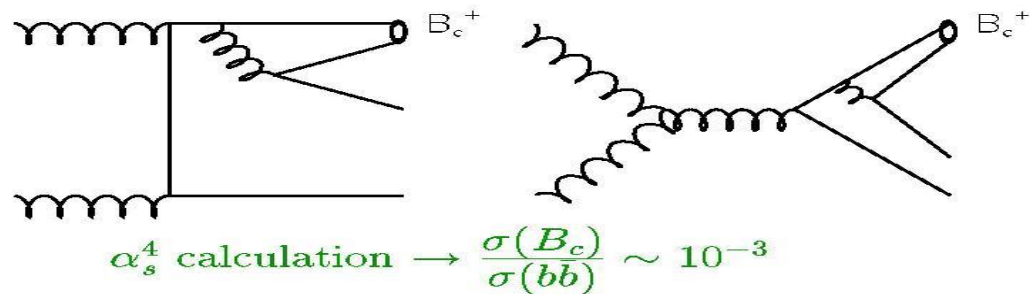
重いクォークの束縛状態 B_c 中間子の発見

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>

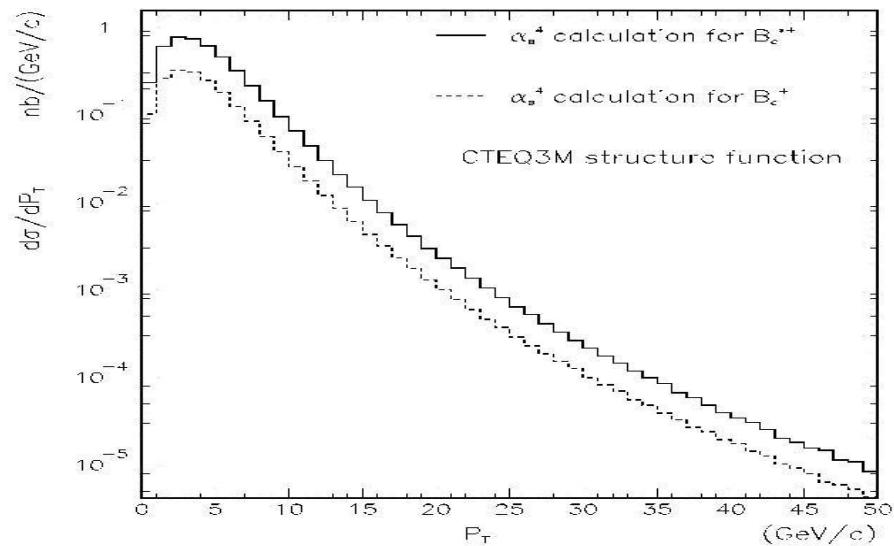
鈴木潤一 <高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所 305-0801 つくば市大穂 1-1 e-mail: jsuzuki@bmail.kek.jp>

1947年の π 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.



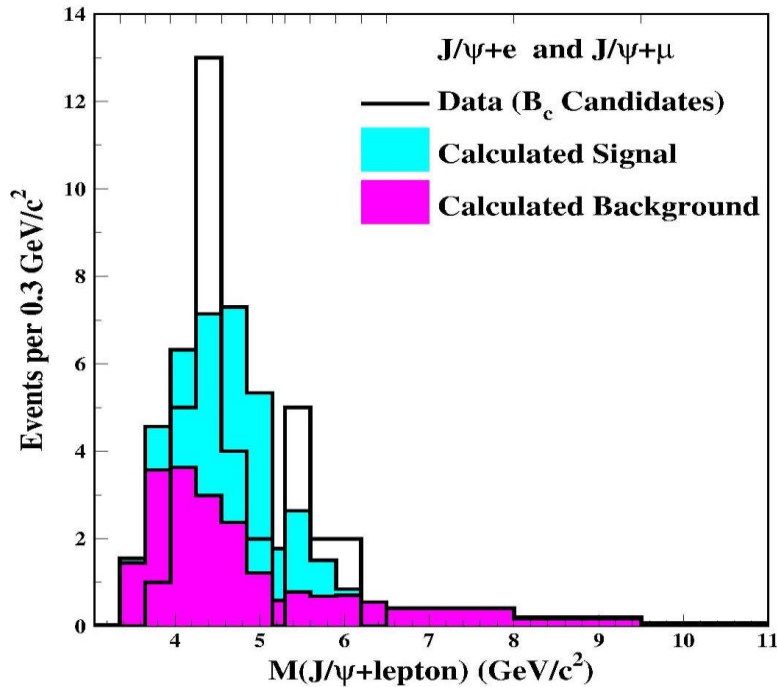
B_c 中間子の発見(1998年)

鈴木潤一(筑波大)博士論文

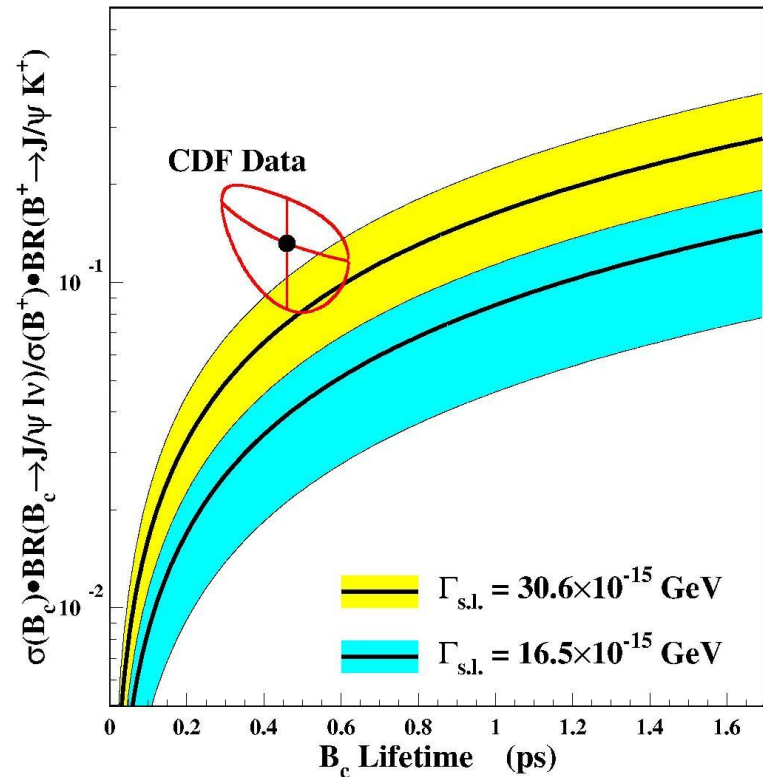
B_c 中間子: ボトムクォークとチャームクォークの束縛状態。
15種類の基本的な中間子のうち、最後に発見された。

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



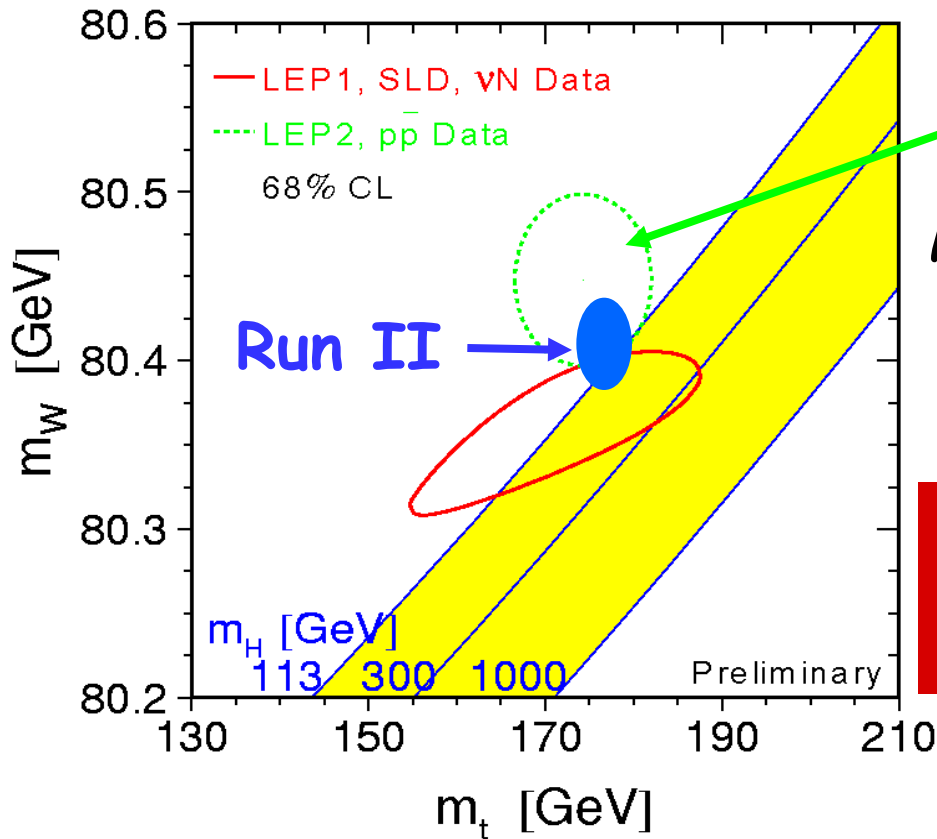
$$N(B_c) = 20.4^{+6.2}_{-5.6}$$



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

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

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

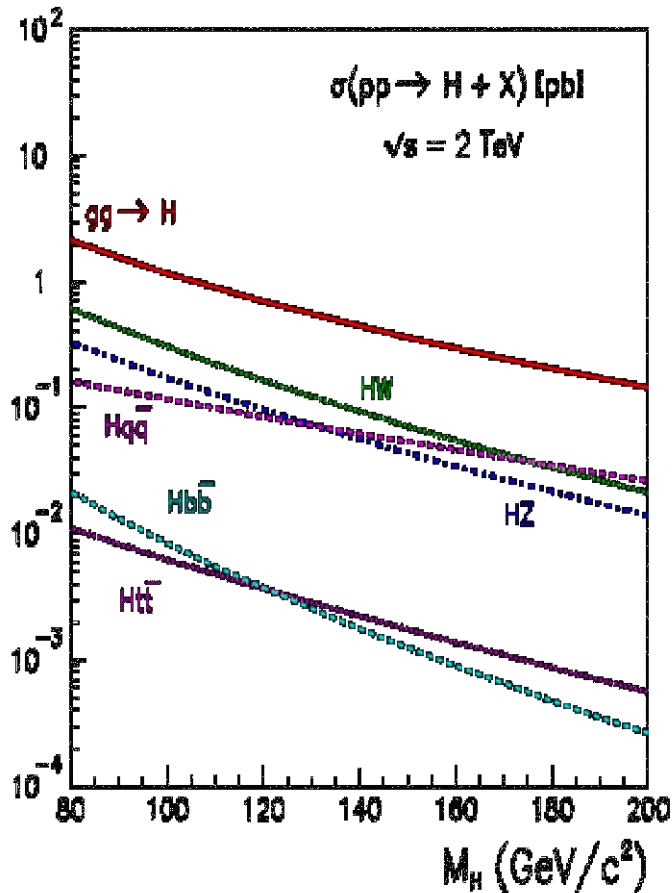
ヒッグス粒子の質量に与えられる
現在の制限： $M_{\text{Higgs}} < 211 \text{ GeV}$
@95%CL

Run II (~2005年末)：

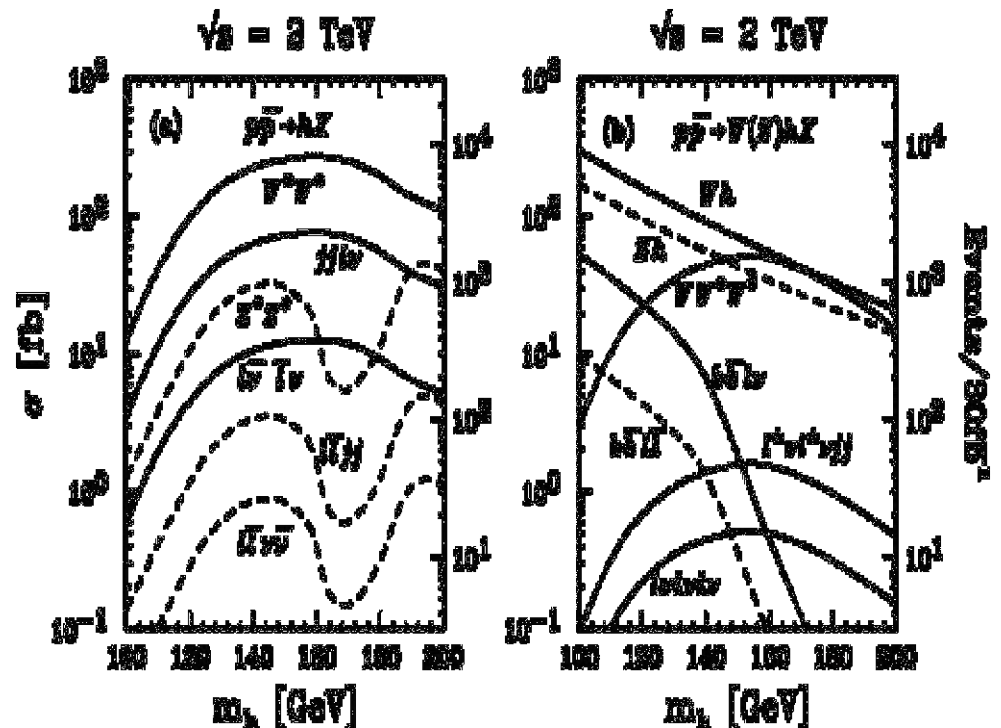
$$\Delta M_{\text{top}} < 3 \text{ GeV}/c^2 \quad \Delta M_W \sim 30 \text{ MeV}/c^2$$
$$\rightarrow \Delta M_{\text{Higgs}} \sim 30\%$$

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

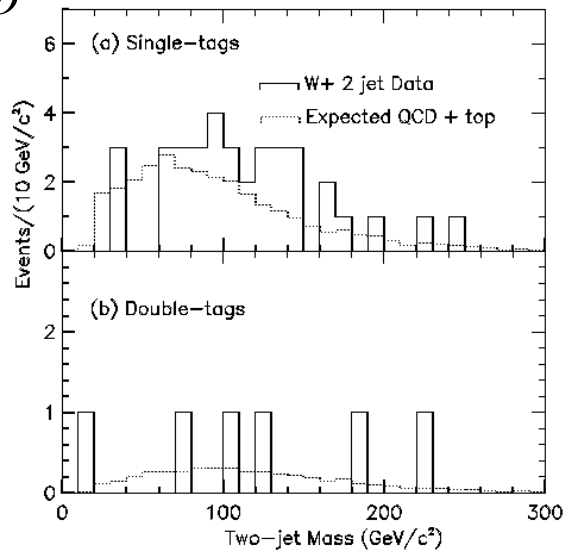


生成断面積x分岐比



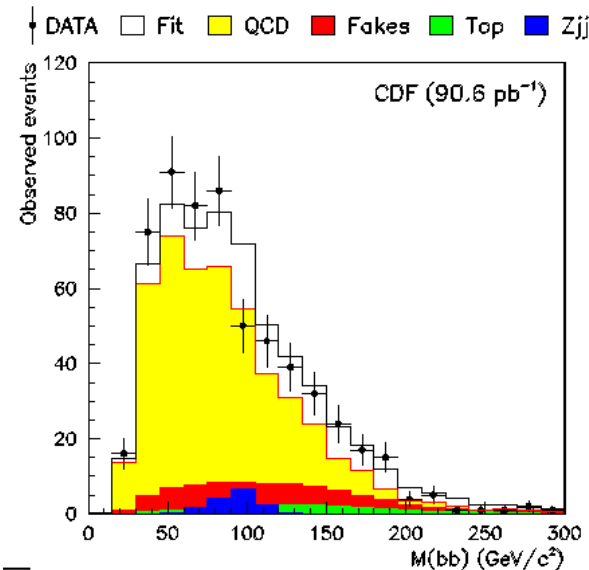
CDF Run I VH searches (106 pb⁻¹)

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



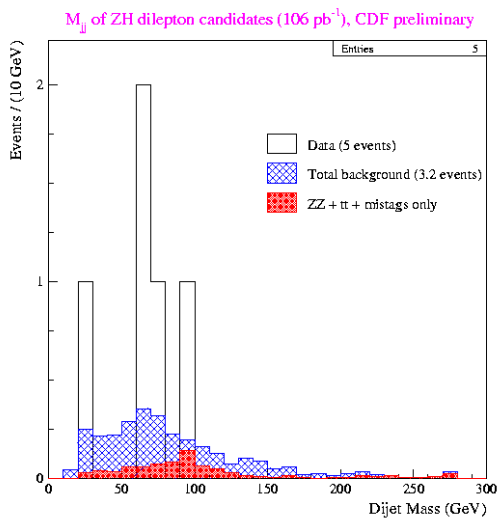
Expect: 30±5 st
6.0±0.6 dt
Observe: 36 st
6 dt

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



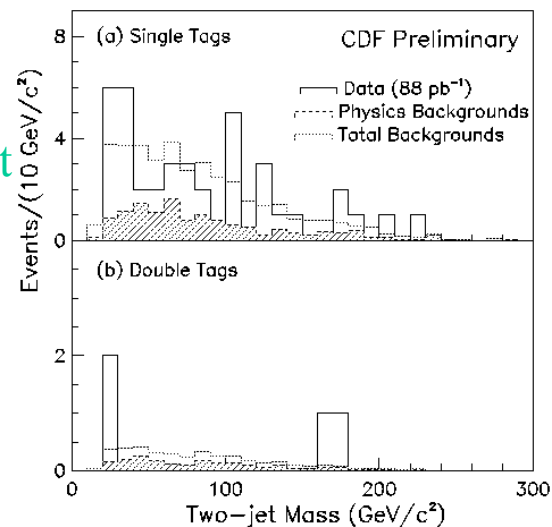
Expect:
600 events
Observe:
580 events

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



Expect: 3.2±0.7 st
Observe: 5

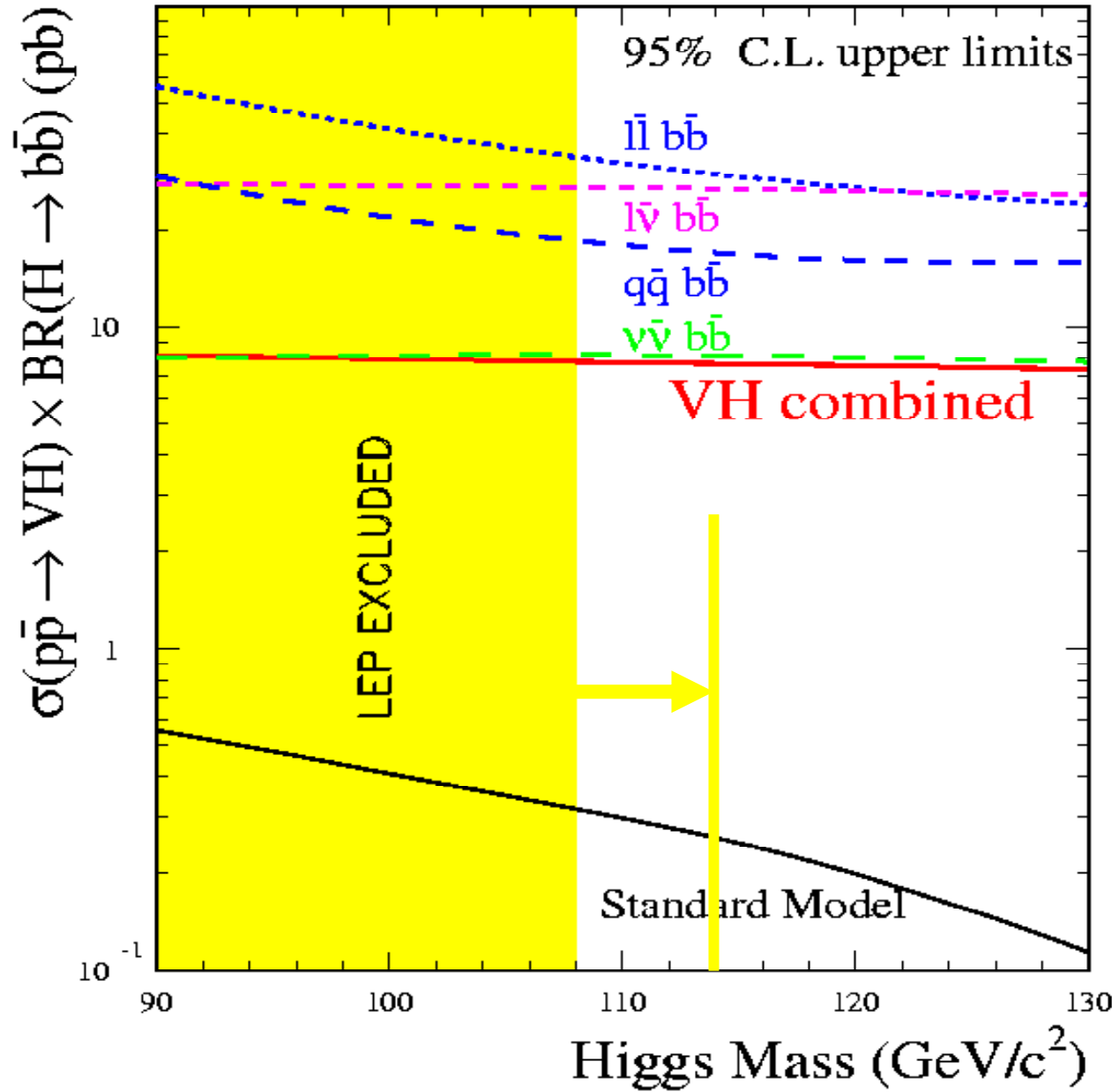
$$ZH^0 \rightarrow \nu\bar{\nu} + b\bar{b}$$



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

VH Production Cross Section Limit

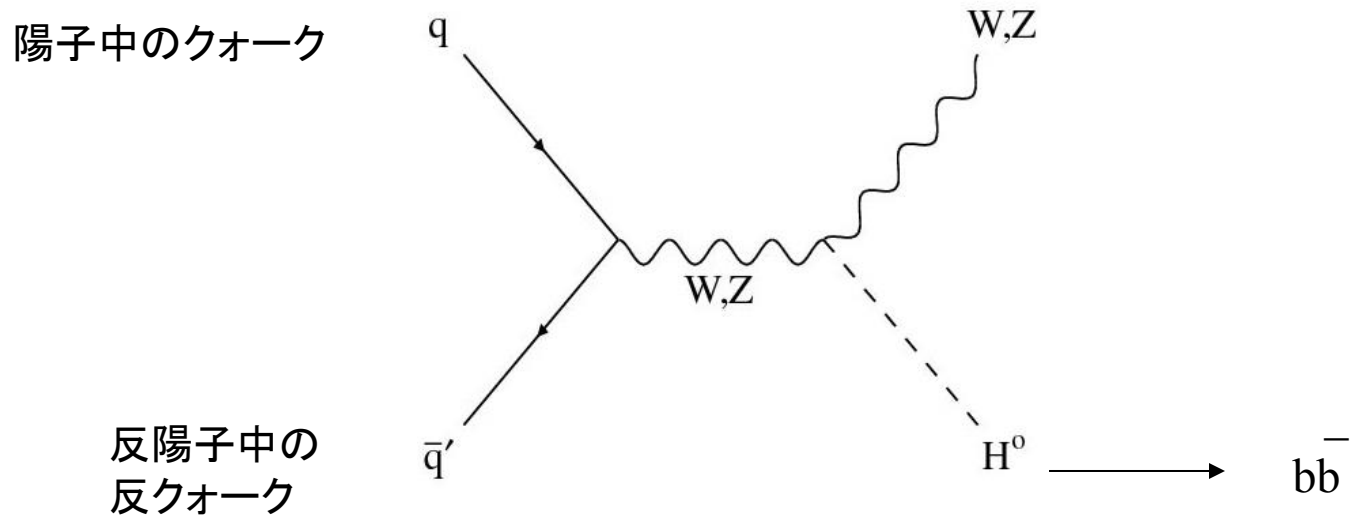
CDF PRELIMINARY Run I



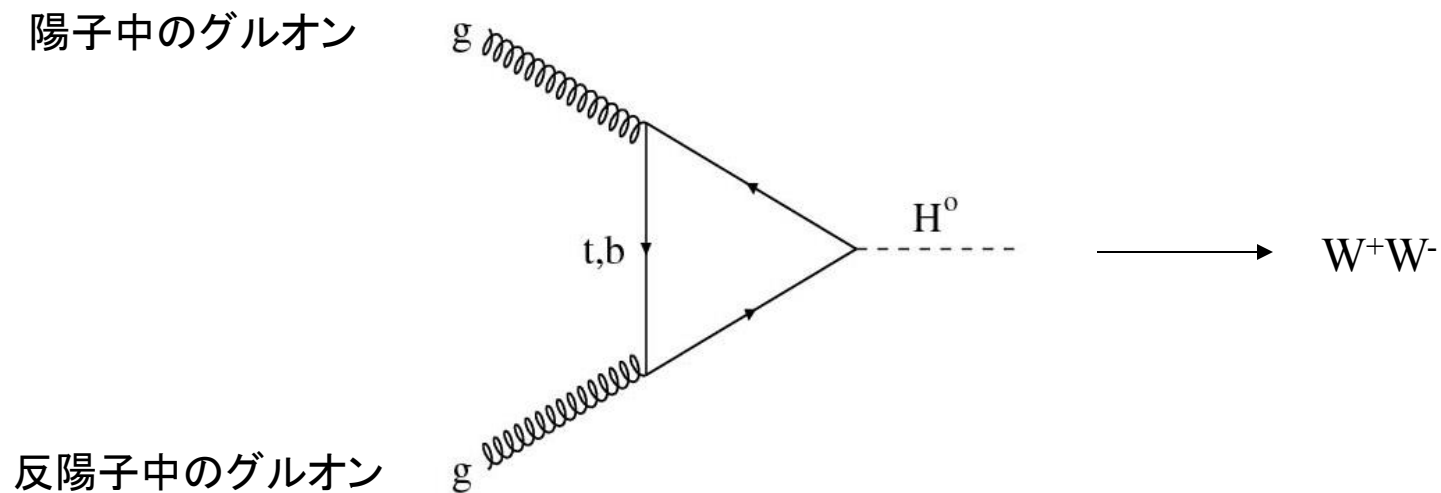
95% CL Limit is about 30 times higher than SM prediction for $M_{\text{higgs}} = 115 \text{ GeV}/c^2$.

ヒッグス粒子の探索

軽いヒッグス粒子 ($M_H < 150\text{GeV}/c^2$)

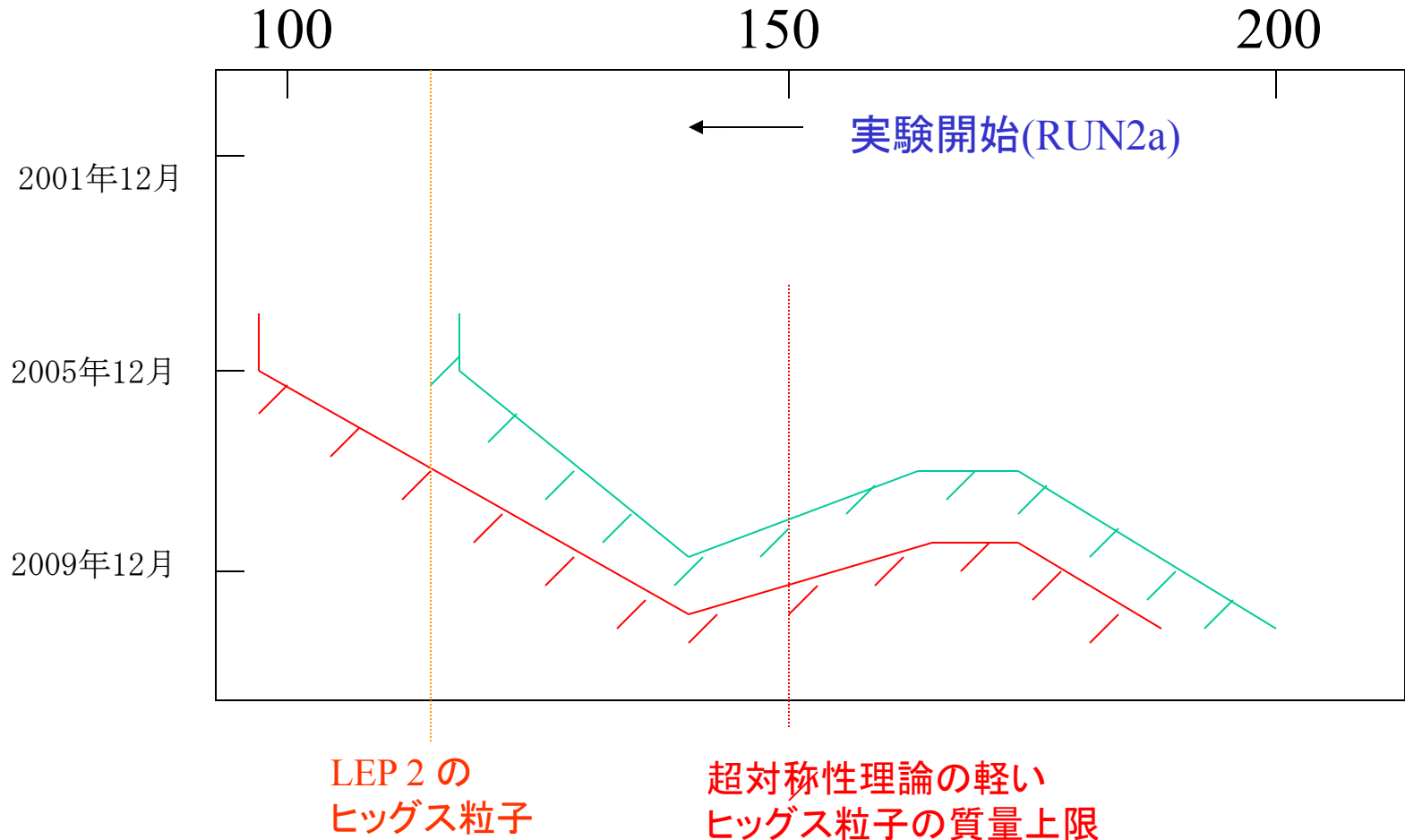


重いヒッグス粒子 ($M_H > 150\text{GeV}/c^2$)



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)



今後のヒッグス粒子探索

• $M_H < 130 \text{ GeV}/c^2$

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

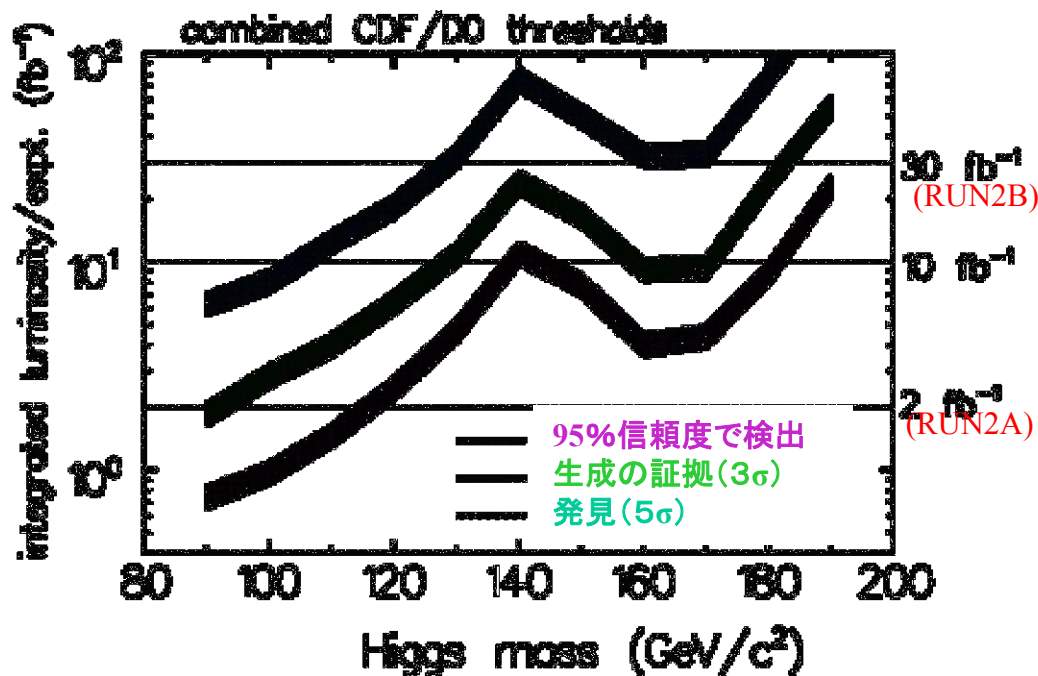
• $125 < M_H < 160 \text{ GeV}/c^2$

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

(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 (3σ 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_{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 $\Delta M_H \sim 0.3 M_H$ 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 (3σ)。

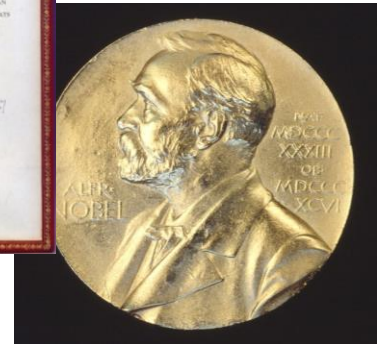
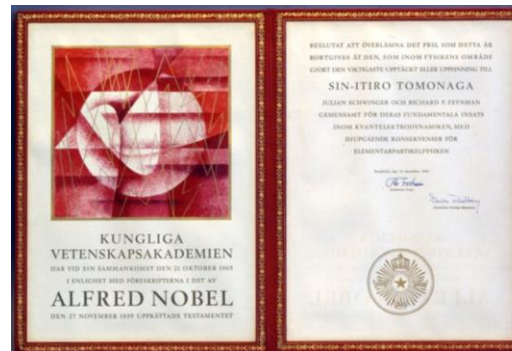
朝永振一郎博士が 21世紀の物理学にもたらしたもの



量子電気力学（素粒子の電磁気力の理論）

くりこみ理論 \Rightarrow 場の量子論

1965年 ノーベル物理学賞
素粒子物理学
（湯川秀樹に続き、日本で2番目）

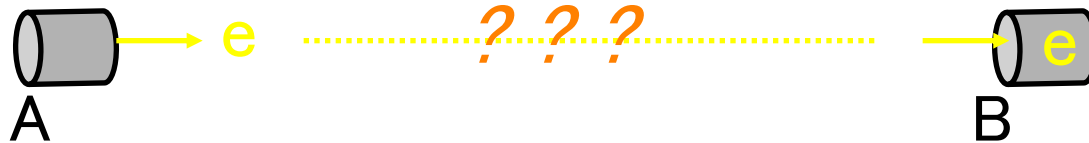


素粒子の世界

見ていなければ、裏で何でもやっている

電子をA点から放出し、

B点で受け取る。



A点とB点で速度が同じなら、

AB間で電子はずっと同じように飛んでいるだろうか？

古典力学では YES

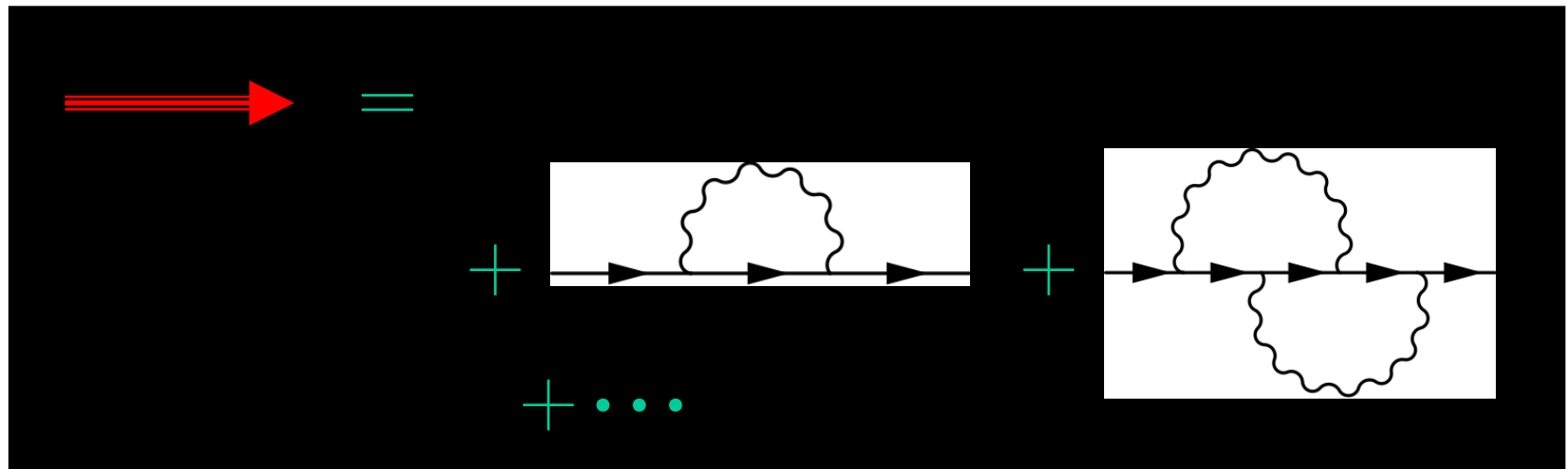
ニュートンの第1法則：外力がなければ、物体は等速直線運動する。

量子力学では NO !!

間に何も無くても、電子はある確率で光子を放出・吸収する。
可能なプロセスは全て実現する。

くりこみ理論

裸の電子 vs 観測される電子



裸の電子は直接は見えない: *電子は恥ずかしがり屋*

我々が実験で見ている電子は、裸の電子ではなく
全ての可能なプロセスを合成した最終結果だけ。

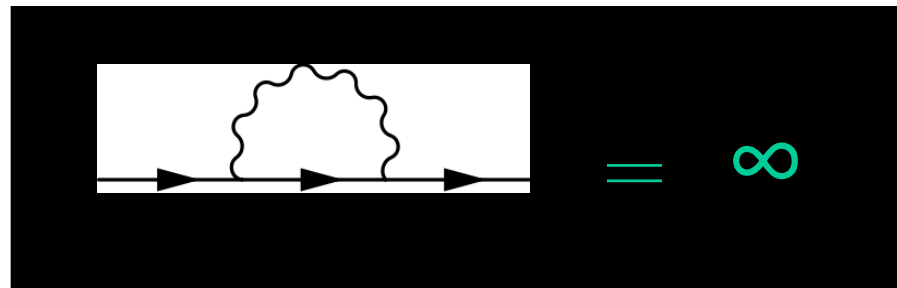
「裸 + 全ての自己相互作用」の結果として、
質量 = $9.11 \times 10^{-31} \text{kg}$, 電荷 = $-1.6 \times 10^{-19} \text{C}$

くりこみ理論

無限大との闘い

困ったこと:

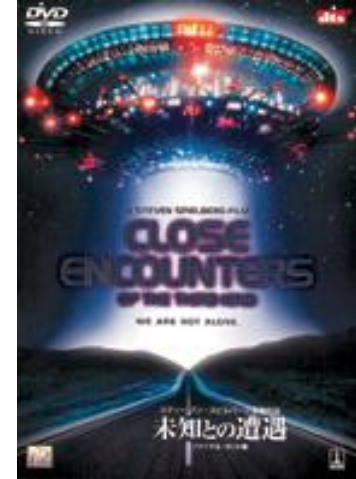
自己相互作用を計算してみると、無限大になってしまう。



朝永が解決: 無限大は質量と電荷にしか出てこない。

=> 見えている電子の質量や電荷を再現するように、
裸の質量や電荷を調整すれば、
無限大はどこにも残らない。

(自己相互作用の無限大は、裸の質量と電荷に全て吸収できる。)

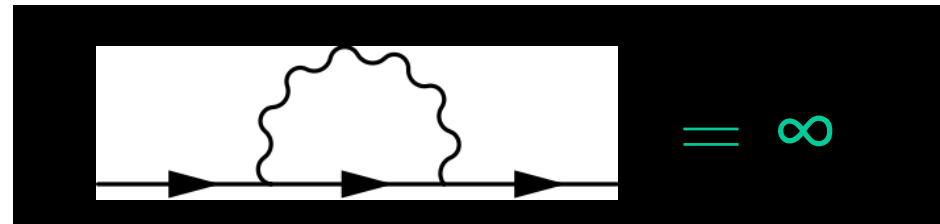


くりこみ理論

無限大との遭遇

困ったこと:

自己相互作用を計算してみると、無限大になってしまう。



途中に飛ぶ光は、無限に短い波長まで可能。
全ての効果を足し合わせると、

$$1+1+1+\dots$$

のように無限大になってしまう。)

くりこみ理論

無限大との闘い

朝永が解決： 無限大は質量と電荷にしか出てこない。

$$\text{物理量} = F(\text{裸の質量} + \text{無限大}, \\ \text{裸の電荷} + \text{無限大})$$

=> 見えている電子の質量や電荷を再現するように、
裸の質量や電荷を調整すれば、
無限大はどこにも残らない。

自己相互作用の無限大は、質量と電荷に全て吸収できる。

$$\text{物理量} = F(\text{観測された質量}, \\ \text{観測された電荷})$$

くりこみ理論

実は身の回りでもよくあること

自己相互作用 = 他に物質が無くても、周りの真空と常に相互作用してしまう。



媒質の中での運動と似ている。

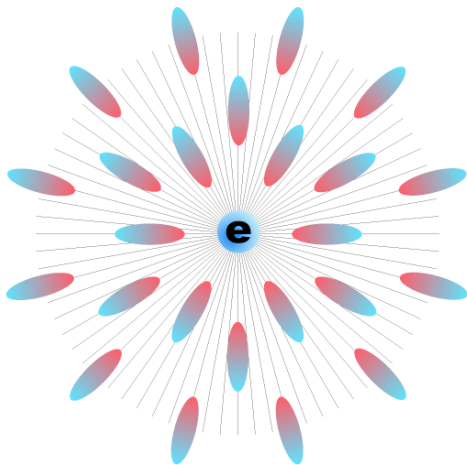
(1) 流体の中で物体を動かす
=> 抵抗を受けて、

もっと重い物体のように振る舞う。

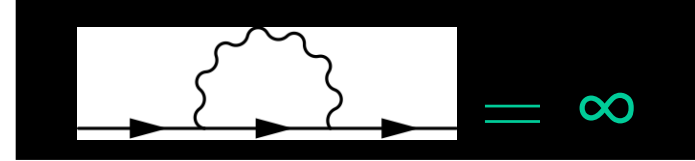
人ごみの中を歩くと、体重が増えたときの気持ちがわかるかも

(2) 誘電物質の中に電荷を置く

=> 誘電分極により電荷がマスクされ
電荷が小さくなったように見える。



くりこみ理論



無限大との闘い その後

そもそも無限大はどこから出てきた？

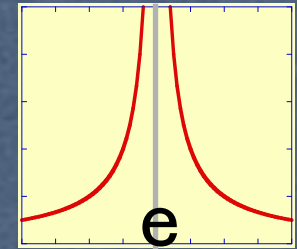
電子が完全な点だから：

◆電子は周りに電場 e/r を作る。

電子が点なら、自分で感じる自分の電場は無限大！

◆半径 a に広がった電荷の静電エネルギーは Ae^2/a

完全な点なら、 $a \rightarrow 0$ で静電エネルギー無限大！

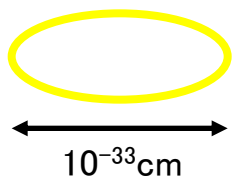


では、電子が広がっていいればいい??

➤ 普通の場合の理論では難しい

みんな失敗した！（湯川の素領域、ハイゼンベルグの世界方程式、・・・）

➤ 超弦理論が現在唯一の候補





1924年 18歳 京都三高時代

