

CDF 実験におけるシングルトップ生成の観測

東京大学素粒子物理国際研究センター

中村 浩二

kojin@icepp.s.u-tokyo.ac.jp

2009年8月15日

1 はじめに

米国シカゴ郊外にあるフェルミ国立加速器研究機構では、陽子・反陽子衝突型加速器テバトロンを用いた実験が行われており、その重心系エネルギー1.96 TeV は、現在運転準備中の加速器 LHC が始動するまでの間、世界最高エネルギーである。二つの粒子衝突点には検出器 CDF と D0 がそれぞれ設置されている。

テバトロン加速器では、1985 年から衝突実験が行われており、標準理論の検証および発展に重要な貢献をしてきた。とりわけ 1994 年の CDF 実験におけるトップクォークの証拠の観測と 1995 年の CDF, D0 実験における発見は、もっとも大きな成果の一つといえる[1]。現在においてもテバトロンはトップクォークを生成できる唯一の加速器としてその特徴の観測を続けている。

テバトロンにおけるトップクォークの生成断面積は約 10pb であり、そのうち強い相互作用を媒介とした対生成(図 1 上)が約 70% を占め支配的である。残りの 30% を占め

るのが弱い相互作用を媒介してボトムクォークと随伴生成する単一トップクォーク生成である。典型的なファインマン図を図 1 下に示す。この過程は素粒子標準理論で予想されており、一般に対生成過程に対してシングルトップクォーク生成過程と呼ばれている。シングルトップクォーク生成の探索は、トップクォーク発見以来、テバトロン加速器のもっとも重要な課題の一つとして 10 年以上もの間探索が続けられてきた。

本稿は、CDF 実験におけるシングルトップクォーク生成事象の発見(2009年3月)[2]について紹介する。

2 探索の動機

シングルトップクォーク生成過程探索の第一の動機は、トップクォークの弱い相互作用を理解することである。トップクォークは、W ボソンおよびボトムクォークに崩壊することから、ボトムクォークと弱アイソスピン二重項を作ることが実験で証明されている。この際、トップクォークのボトムクォークとの弱相互作用の強さは、小林・益川行列の第三世代要素($|V_{tb}|$)に正比例する。これまでテバトロン加速器において、トップクォークの崩壊をもちいた測定から $|V_{tb}|$ に関して以下のような制限が与えられてきた[3]。

$$\frac{|V_{tb}|^2}{|V_{td}|^2 + |V_{ts}|^2 + |V_{tb}|^2} > 0.78$$

クォークの世代数を三と仮定すると小林・益川行列のユニタリティからの要請で分母は 1 となり、間接的に $|V_{tb}|$ に対する制限を与えている。また、トップクォークの全崩壊幅 Γ_t に関して、トップクォークの不変質量分布の幅を用いて以下のような上限値が与えられている[4]。

$$\Gamma_t < 13.1 \text{ GeV}$$

この測定は、トップクォークの質量を再構成する際、ジェットのエネルギーやニュートリノによる損失エネルギーの再構成が大きな測定誤差を含むことから標準理論で予想される全崩壊幅(1.5 GeV)を測定することは非常に困難である。シングルトップクォーク生成過程を用いると、その生

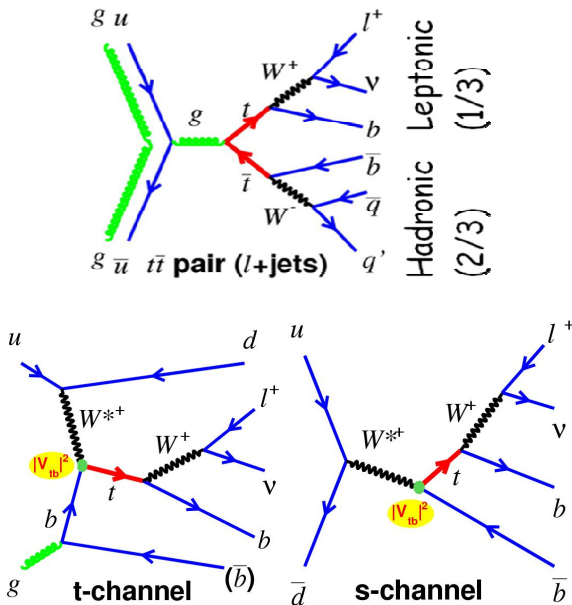


図1 テバトロン加速器における主要なトップクォーク対生成過程(上), およびシングルトップクォーク生成過程(下)のファインマン図

成過程に W - t - b 結合が存在することから、生成断面積を測定することで、これらの物理量を直接測定することが可能である。また、この測定は、クォークの世代数を三と仮定する必要はなく、第四世代クォークの有無に対する制限も期待できる。

第二の動機として(あえてこれを二番目にあげるが)、今後 LHC 加速器における実験などで本格化するヒッグス粒子などの新粒子探索を行う上での解析手法確立、バックグラウンド事象の理解、さらには、シングルトップクォーク生成過程それ自体が新粒子探索におけるバックグラウンドになることがあげられる。詳細は後述するが、シングルトップクォーク生成過程の探索は、その信号バックグラウンド比が小さいことから、非常に困難であった。現在、テバトロン加速器における低質量ヒッグス粒子探索で、もっとも発見に対する感度が高い生成崩壊過程は、 W ボソンと随伴して生成し、ボトムクォーク対に崩壊する過程であるが、この過程は、シングルトップクォーク生成過程と同一の終状態粒子を持つ。このように、少量の信号を膨大なバックグラウンドから分離する解析手法の確立は、今後の新粒子探索にとってもきわめて重要な役割を果たす。

その他の動機として、トップクォークの偏極特性の観測や標準理論を越える物理の探索などがあげられる。トップクォークは生成後ただちに崩壊するため、ハドロン化しないことが予想されている。つまり、崩壊するまでそのスピン状態は変化しない。これは、トップクォーク対生成過程において二つのトップクォークのスピン状態の相関を観測することで立証可能であると考えられている。シングルトップクォーク生成崩壊過程はすべて弱相互作用で起こるため、実験室系でのトップクォークの偏極の方向を知ることができる。この特徴を利用してトップクォークの偏極を観測することで、弱相互作用 (V - A) の結合を理解することが可能である。また、標準理論を越える物理の存在は、シングルトップクォーク生成断面積を変化させる可能性がある。たとえば s -チャンネル過程(図 1 左下)の W^* ボソンの代わりに重いゲージボソン(たとえば、 W')や、荷電ヒッグス粒子が媒介することで s -チャンネル過程の生成断面積は変化する[5]。また、フレーバーを変える中性カレント(FCNC)の存在や第四世代クォークの存在は t -チャンネル過程(図 1 右下)の生成断面積を変える[5]。このようにシングルトップクォーク生成過程の生成断面積の測定は標準理論を越える物理に対しても感度をもつ。典型的な標準理論を越える物理が予想する生成断面積を図 2 に示す。また、 s -チャンネルと t -チャンネルの過程が異なる物理に対して感度があることから、これらを分けて測定することも大きな意味を持つ。また、LHC 実験においてのシングルトップクォーク生成過程の探索は、陽子・陽子衝突型加速器であることが原因で、 s -チャンネル過程の生成が相対的に小さくなり(t -チ

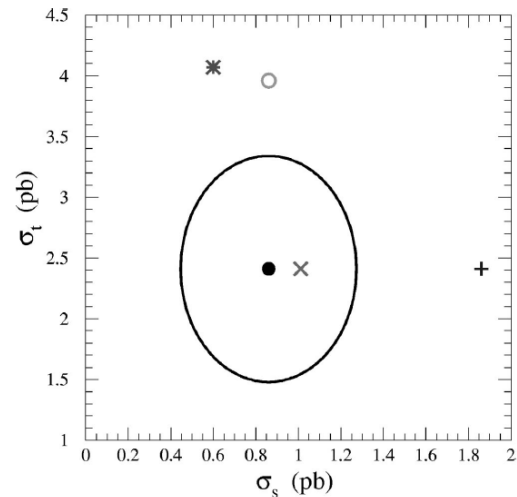


図 2 生成過程別に見たシングルトップクォーク生成断面積
横軸： s -チャンネル，縦軸： t -チャンネル。黒塗りの点およびそのまわりの円は標準理論が予想する断面積および 3σ の誤差を表す。その他の点は、典型的な標準理論を越える物理が予想する生成断面積，アスタリスクは第四世代モデル，白抜きのは FCNC，十字は新しいボソンやメソンの存在するモデル，X はトップクォークフレーバーモデルを示す[5]。

ャンネルの約 $1/20$)、探索がさらに困難になることが知られている。つまり、テバトロン加速器実験で s -チャンネル・シングルトップクォーク生成過程の探索を行うことは大切である。

3 探索の難しさ

実際に行われた解析について紹介する前にシングルトップクォーク過程の探索の難しさについて述べておかなければならない。シングルトップクォーク生成過程の発見が対生成過程の発見から 13 年も時間を要したのは相対的な生成断面積が小さいこと以上に、バックグラウンド事象の除去が困難であったことが原因である。

トップクォーク対生成過程の研究は、おもに終状態にレプトンが存在する過程で行われる。もっとも感度の高い崩壊過程は、終状態の W ボソンのうち片方がハドロンに、もう一方がレプトンに崩壊する過程である(図 1 上)。生成されたクォークはただちにハドロン化してジェットと呼ばれる粒子群を生成するため、トップクォーク対生成過程の終状態は一つのレプトンおよび 4 本のジェットとなり、また、生成されたニュートリノが大きな損失エネルギーとして観測される。これに対し、シングルトップクォーク生成過程の終状態は、一つのレプトン、2 本もしくは 3 本のジェット、および大きな損失エネルギーとなる。

テバトロン加速器におけるトップクォークの探索および測定を行う際、もっとも支配的なバックグラウンド過程は、 W ボソンとクォークもしくはグルーオンからのジェットが同時に生成される過程であり、ジェットの数が少ないほ

ど生成断面積が大きくなる。したがってシングルトップクォーク生成過程の、対生成過程と比較して、ジェットの本数が少ないという特徴が、このバックグラウンドからの分離に致命的な影響をもたらす。典型的な事象選択をおこなった後の信号およびバックグラウンドのジェット数依存性を、図3に示す(ただし、凡例と分布図は同順)。緑系色(凡例の上から3-5番目)は W ボソンとジェットのバックグラウンド過程を示して、シングルトップクォーク生成過程(赤および橙、凡例の上から1-2番目)の信号バックグラウンド比は、対生成過程(黒)の信号バックグラウンド比と比較して非常に小さいことがわかる。すなわち、発見および生成断面積の測定は、対生成過程に関しては事象数の計測から導くことが可能であるが、シングルトップクォーク生成過程に関しては系統誤差(図の斜線領域)を考慮すると非常に困難であり、バックグラウンド事象とのわずかな運動量分布の違いを利用した多変数解析が必要である。これには、信号およびバックグラウンド事象の詳細な理解が必要不可欠であった。

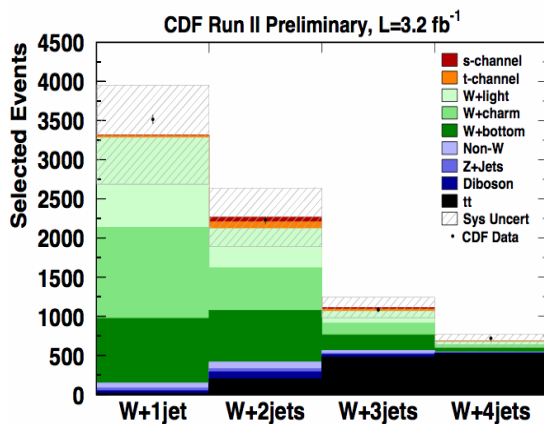


図3 信号およびバックグラウンド事象のジェット数依存性

いうまでもないことではあるが、解析は信号領域をブラインドした状態で行われており、また、バックグラウンド事象の見積もりは可能な限りデータを用いて行っており、さまざまな方法での見積もりによる差を保守的に系統誤差として与えて、探索および測定を行った。

4 データ解析

テバトロン加速器では2001年春から、衝突実験 Run II が行われており、CDF 実験では2008年夏までに約 4 fb^{-1} のデータを取得し(図4)、そのうち、データの質のよい 3.2 fb^{-1} 相当のデータを用いて解析をおこなった。CDF 検出器は、さまざまな物理解析に対応できるような汎用型検出器として設計建設され、現在まで順調に運転されてきた。内側から、シリコンストリップ検出器およびワイヤーチェンバ検出器からなる内部飛跡検出器、ソレノイド電磁石、電磁およびハドロンカロリメータ、最外部にはミュー粒子検出器が設

置されている(図5)。テバトロン加速器の Run II 実験開始時には前方のカロリメータ、トリガーシステム、データ取得システムに大幅なアップグレードが行われ、より効率的にデータが取得可能となった。

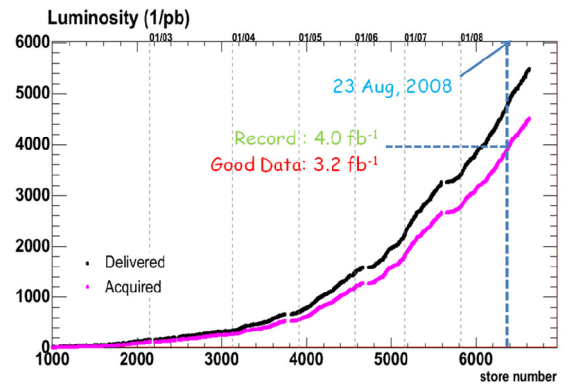


図4 テバトロン加速器の積分ルミノシティ(黒)とCDF 実験における取得データ量

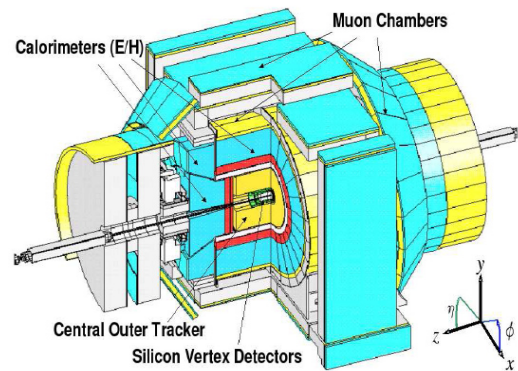


図5 CDF 検出器

大きな横方向運動量を持つ電子またはミュー粒子、もしくは、大きな損失エネルギーとジェットが2本存在する事象をトリガーして候補事象データを取得した。取得したデータに対して、より高度なレプトン選択、補正された損失エネルギーやジェットエネルギーによる事象選択、少なくとも1本のボトムクォークが同定されたジェットを要求することにより、信号バックグラウンド比を上げた。しかし、これらの高度な事象選択を用いても信号バックグラウンド比は約 $1/20$ であり、典型的なバックグラウンドの系統誤差(約30%)を考慮すると、より高度な解析が必要となる。

解析には、六つの異なる多変数解析手法が用いられ、最終的にそれらの結果を統合することでシングルトップクォーク生成過程の信号の有意性を観測した。

前述した終状態を持つ事象に対して、バックグラウンド事象との分離を行うため、生成過程の不変振幅を用いた手法(Matrix Element, ME)、ニューラルネットワーク(NN)を用いた手法、多変数最尤法(Likelihood Function, LF)、最適判別樹(Boosted Decision Tree, BDT)を用いた手法を用

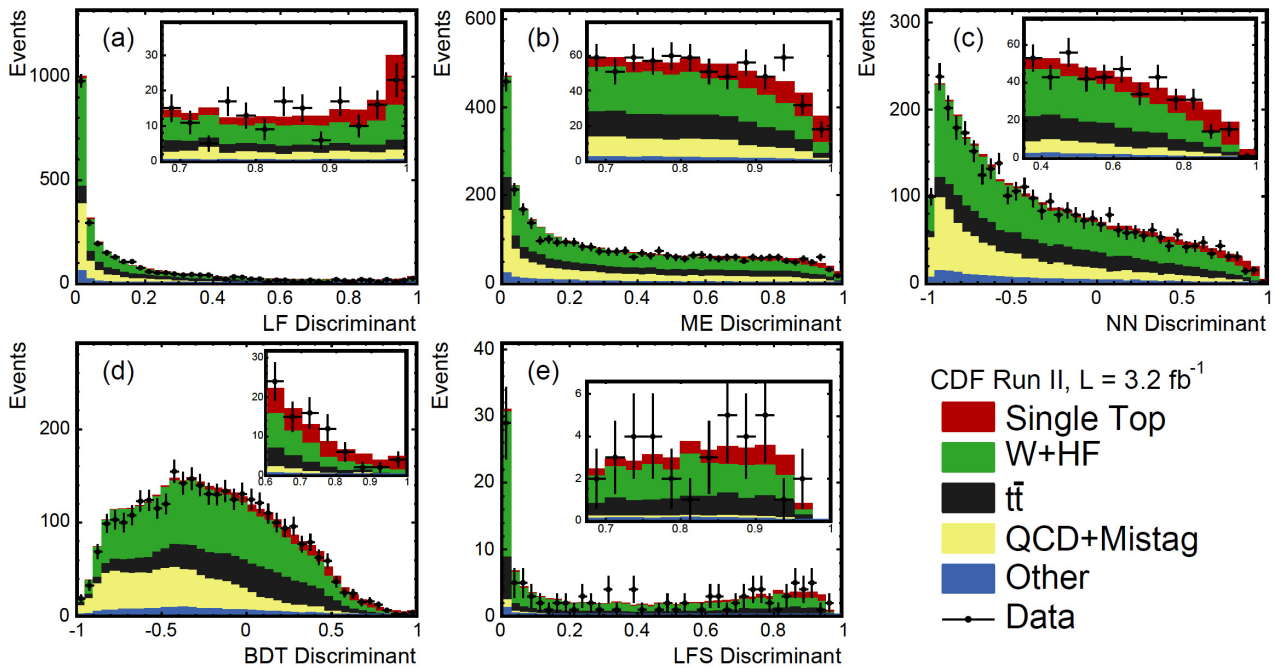


図6 レプトンを含む解析の判別式分布

それぞれ, (a) LF, (b) ME, (c) NN, (d) BDT, (e) LFS を示す。誤差付きの点はデータを示し、ヒストグラムは信号およびバックグラウンドを示す。図の積層と凡例は同順であり最上部の赤色(白黒印刷の場合は色の濃い部分)が期待される信号である。

いた。最尤法に関しては、 s -チャンネルに特化した手法(LFS)、 t -チャンネルに特化した手法(LF)があり、計5種類の方法でそれぞれ解析を行った。ここで、LFS以外の解析はすべて同様の事象選択を行って、LFSの解析は、少なくとも二つのボトムクォークが同定された事象のみを用いているため、その部分事象集合を用いている。さらにCDF検出器のレプトン検出効率が100%ではないことから、信号の中にはレプトンを検出できなかった事象が存在する。これらの事象に関しては、QCD過程によるバックグラウンドが膨大であり、非常に困難であったが、損失エネルギーの高い閾値を要求することで、ニューラルネットワークを用いた手法を駆使することで解析を可能にした(Missing Energy+Jets, MJ)。

図6はレプトンを用いた五つの解析の最終的な判別式の分布であり、それぞれ、(a) LF、(b) ME、(c) NN、(d) BDT、(e) LFSを示す。判別式は、信号らしい事象で1に近づくようにそれぞれ定義されている。誤差付きの点はデータを、ヒストグラムは信号およびバックグラウンドの予想分布を示し、各判別式分布の内側に表示されている図は、信号領域、すなわち1に近い部分を拡大したものである。ただし、図の積層と凡例は同順であり最上部の赤色(白黒印刷の場合は色の濃い部分)が期待されるシングルトップクォーク事象である。

五つの解析を統合するための手法として、それぞれの解析の判別式の値を入力値としたニューラルネットワークを用い、その出力を統合判別式(Super Discriminant, SD)とし

た。SD分布を図7上に、レプトンを含まない解析(MJ)の判別式を図7下にそれぞれ示す。ここで、SD分布に用いた事象とMJ解析に用いた事象は独立である。

最後に系統誤差の見積もりについて簡単に触れる。支配的なバックグラウンドに関して、実データをもとに見積もっているが、見積もりによる系統誤差は必ずしも小さな

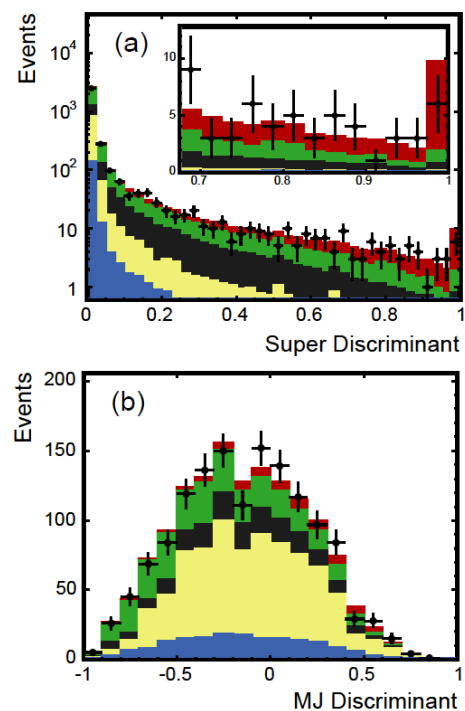


図7 (a)レプトンを含む五つの解析の統合判別式分布 (b)レプトンを含まない事象の判別式分布
ただし、凡例は図6を参照。

い。もっとも支配的な W ボソンとボトムクォークが生成するバックグラウンド過程では、ジェットがボトムクォーク起源である確率の不定性をもっとも大きく、これによる系統誤差は、保守的に見積もってはいるが、規格化定数の約 40% にも及ぶ。その他の系統誤差源として、ジェットのエネルギー補正、ボトムクォーク同定効率、レプトン同定効率、トリガー効率、初期および終状態の輻射、陽子構造関数、ファクトリゼーションおよびリノーマリゼーションのスケール、バックグラウンドのモデルを考慮した。また、すべての系統誤差源に関して、可能な限りその規格化および判別式分布の形の両方に対する系統誤差を見積もった。

信号およびその各バックグラウンド要素に系統誤差を含め、図 6 および図 7 の判別式分布をフィットすることで、信号の有意性および生成断面積を計算した。

5 生成断面積の測定と発見

2007 年、シングルトップクォーク生成過程の証拠が観測されて以来、CDF 実験ではシングルトップクォーク生成断面積を測定してきた[6]。今回報告する解析では、事象選択後、観測可能な信号は約 250 事象が期待されている。

生成断面積を求める手法として、平坦な確率分布を仮定した Bayesian Binned Likelihood [7] と呼ばれる方法を用いた。生成断面積は、その事後確率が最大となる値を中心値とし、その値から積分値が 68% になる距離を測定誤差とした。各解析手法による判別式を用いた生成断面積の値、レプトンを含む解析の統合(SD)、さらに六つすべての解析を統合した生成断面積の結果を表 1 左列(Cross Section)に示す。

すべての解析を統合した解析による生成断面積の測定精度は、約 25% である。また、生成断面積の標準理論の予想との比較を、図 8 にそれぞれ示す。すべての手法、およびその統合で測定値は標準理論による予想値と誤差の範囲で一致している。これらの測定は、トップクォークの質量を $175 \text{ GeV}/c^2$ と仮定して計算している。生成断面積のトップクォーク質量依存性は、 $+0.02 \text{ pb}/(\text{GeV}/c^2)$ である。

表 1 六つの解析手法および統合後のシングルトップクォーク生成過程の生成断面積(左列)、発見に対する観測された感度(中央列)および予想感度(右列)。

Analysis	Cross Section (pb)	Significance (Std. Dev.)	Sensitivity (Std. Dev.)
LF	$1.6^{+0.8}_{-0.7}$	2.4	4.0
ME	$2.5^{+0.7}_{-0.6}$	4.3	4.9
NN	$1.8^{+0.6}_{-0.6}$	3.5	5.2
BDT	$2.1^{+0.7}_{-0.6}$	3.5	5.2
LFS	$1.5^{+0.9}_{-0.8}$	2.0	1.1
SD	$2.1^{+0.6}_{-0.5}$	4.8	> 5.9
MJ	$4.9^{+2.5}_{-2.2}$	2.1	1.4
Combined	$2.3^{+0.6}_{-0.5}$	5.0	> 5.9

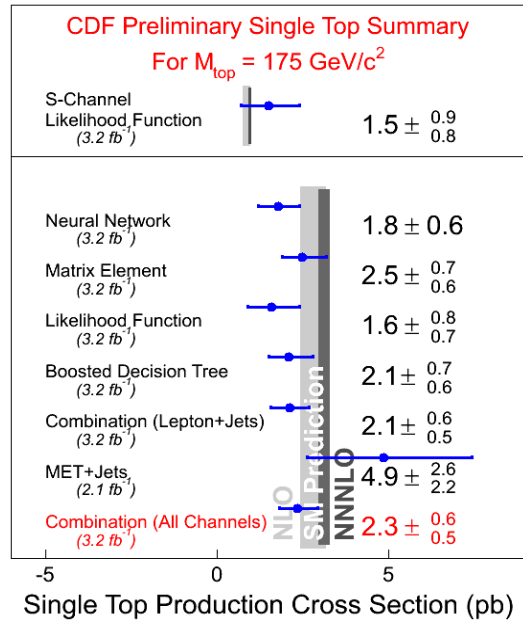


図 8 シングルトップクォーク生成過程の生成断面積誤差付きの点は測定値、縦帯は標準理論の期待値を示す。

信号の有意性を求める手法として次のように定義される Q 値を用いた[8]。

$$-2 \ln Q = -2 \ln \frac{p(\text{data}|s+b)}{p(\text{data}|b)}$$

分子は信号とバックグラウンドが存在すると仮定したときの確率、分母はバックグラウンドのみを仮定したときの確率である。バックグラウンドのみの判別式分布にしたがうシミュレーションデータを 3 億事象生成し、 Q 値分布を作成し(図 9 の右側のヒストグラム)、実際のデータから観測された Q 値が観測される確率を p 値として求めた。また、信号とバックグラウンドの判別式分布の和にしたがうシミュレーションデータを同様に生成し、 Q 値分布を作成し(図 9 の左側のヒストグラム)、その中央値がバックグラウンドのシミュレーションデータから作った Q 値分布から観測される確率を標準理論の予想する p 値とした。

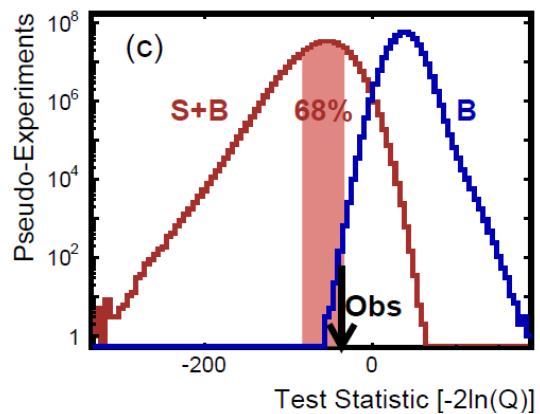


図 9 Q 値分布

信号とバックグラウンドの判別式から作った偽データによるもの(S+B)と、バックグラウンドのみの判別式から作った分布(B)、および実際に観測された Q 値(Obs)を示す。

それぞれ計算された p 値を正規分布の標準偏差を用いて表したものを信号の有意度として、表 1 中央(観測値)および右列(標準理論の予想値)に示す。標準理論による期待値は、 5.9σ を超え、観測された有意度は 5.0σ となっていて、シングルトップクォーク生成過程の発見を達成することができた。また、 s -チャンネル過程のみの信号の有意度は LFS 解析単独で 2.0σ であり、近い将来には証拠の観測が期待できる。

前述したように、この生成断面積は、小林・益川行列の第三世代要素 $|V_{tb}|$ と密接な関係がある。生成過程に W - t - b 結合が存在することから、生成断面積は $|V_{tb}|^2$ に比例する。つまり、 $|V_{tb}|$ は、以下のような式で計算することができる。

$$|V_{tb}^{\text{measured}}|^2 = \frac{\sigma_{\text{measured}}}{\sigma_{\text{SM}}} \times |V_{tb}^{\text{SM}}|^2$$

標準理論における $|V_{tb}|$ の大きさはほぼ 1 であるため、測定された生成断面積と標準理論値の比が $|V_{tb}|$ の二乗に相当する。結果として、

$$|V_{tb}| = 0.91_{-0.11}^{+0.11}(\text{stat. + syst.}) \pm 0.07(\text{theory})$$

を得た。ここで、理論による誤差は、標準理論の生成断面積に対する誤差を $|V_{tb}|$ に伝搬させたものである。また、平坦な確率分布を仮定することにより、事後確率分布(図 10)を作成し、物理領域 ($0 < |V_{tb}| < 1$) における 95% C.L. の下限値を導出した。

$$|V_{tb}| > 0.71(95\% \text{ C.L.})$$

これらの測定はいうまでもなく、現在世界最高精度の測定結果である。

さらに s -チャンネルに最適化された LFS 解析から $|V_{tb}|$ を求めることも重要な意味をもつ。これは、 t -チャンネル過

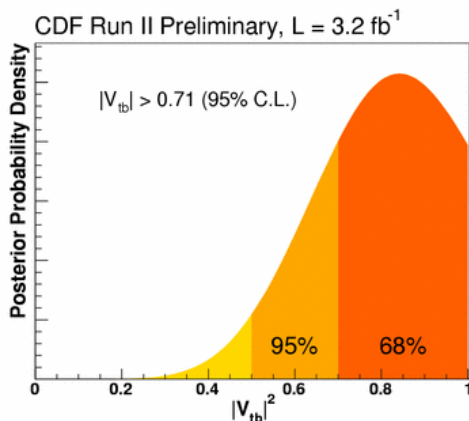


図 10 $|V_{tb}|^2$ 測定の事後確率分布

程における $|V_{tb}|$ の測定には、陽子構造関数の不定性が大きいためである。以下に LFS 解析による $|V_{tb}|$ の測定値および下限値を示す。

$$|V_{tb}| = 1.43_{-0.26}^{+0.38}(\text{stat. + syst.}) \pm 0.11(\text{theory})$$

$$|V_{tb}| > 0.53(95\% \text{ C.L.})$$

最後に s -チャンネルと t -チャンネルの生成断面積の二次元フィットの結果について紹介する。先に述べたように、標準理論を越える物理は s -チャンネルと t -チャンネルの生成断面積の比を変える。まず、 t -チャンネルに最適化した解析 LF と s -チャンネルに最適化した解析 LFS を t -チャンネルおよび s -チャンネルの生成断面積の両方とも変数として二次元フィットを行い、 $\sigma_s - \sigma_t$ 平面における生成断面積の中心点とその測定誤差を求めた(図 11)。点はその測定点を色のついた領域はそれぞれ 68%, 95% C.L. の測定誤差を、誤差付きの点は理論値とその 68% C.L. の誤差を示す。測定値は、理論値に対し、 s -チャンネルは高く、 t -チャンネルは低い生成断面積が得られたが、誤差の範囲内で一致している。

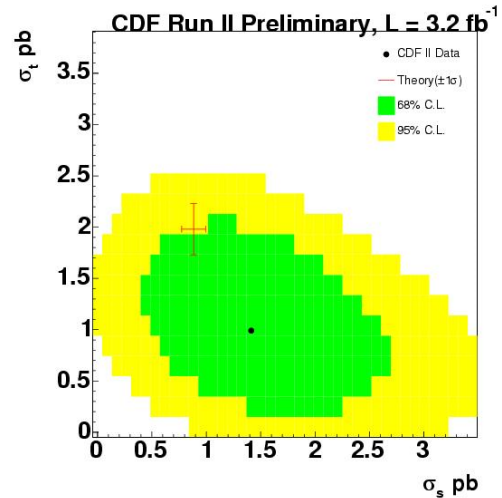


図 11 $\sigma_s - \sigma_t$ 平面における生成断面積の中心点とその測定誤差。誤差棒は標準理論による期待値を示す。

蛇足ではあるが、本解析でもっともシングルトップクォーク生成らしい事象のうち 1 事象をイベントディスプレイで紹介する。図 12 上は、ビーム軸に垂直な断面を見たもので、左方向にミュー粒子が、左下および右方向にジェットが、上方向に損失エネルギーが再構成された事象である。図 12 下は、カリメータで測定されたエネルギーを示して、2 本のジェットが再構成された。

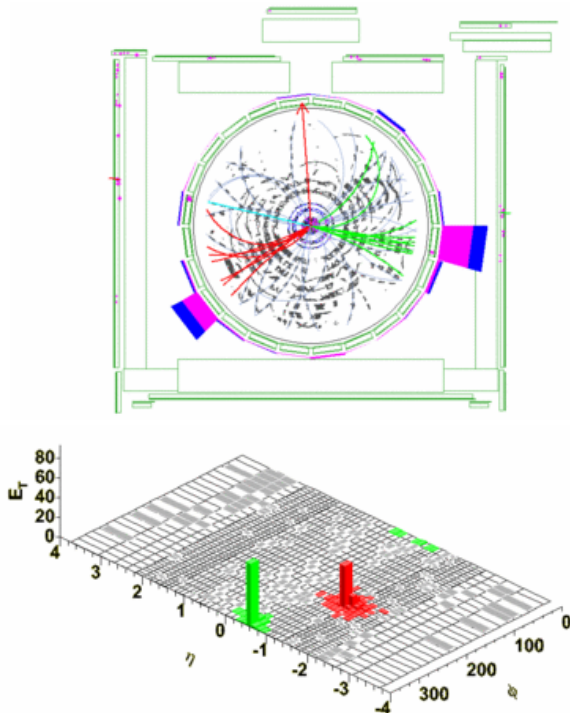


図 12 典型的なシングルトップクォーク事象のイベントディスプレイ。

6 結果の意義と展望

CDF 実験では、トップクォークの対生成過程の発見から 13 年間、シングルトップクォーク生成過程の探索を行ってきた。膨大なバックグラウンドが存在することから探索は非常に困難であったが、2009 年 3 月ついに発見に至った。また、本稿では言及しなかったが、D0 実験でも、CDF 実験と同時に発見を報告した。また、トップクォークの弱い相互作用による生成を確認するだけでなく、その相互作用の強さは標準理論で予想されたものと一致することを測定するにいたった。これは、トップクォークの存在をより確実にすると同時に現在まで測定不可能だったトップクォークの弱相互作用の強さや特性を精密測定することができる時代になったともいえる。

今回の発見の意義として、未発見であった標準理論で予想される現象を確認し、測定したということはいまでもなく重要なことであるが、それと同時に今後数十年、高エネルギー加速器実験の中心となって続くであろうハドロン衝突型加速器の膨大なバックグラウンドを可能な限り理解し、その中に存在する微量の信号を確認したということも非常に重要なことであったと考える。

今後の展望だが、図 13 に、CDF 実験における $|V_{tb}|$ 測定の精度の予想を積分ルミノシティの関数で表したものを示す。テパトロン機の運転終了まで約 $6 \sim 8 \text{ fb}^{-1}$ のデータを取得する予定であり、約 $6 \sim 7\%$ の精度で測定可能であることを示す。また、D0 実験との統合を現在進めており、さらなる

高精度での測定が可能となる。また、トップクォークの偏極に関する研究も現在進行中であり、近いうちに結果を出す予定である。また、シングルトップクォーク生成過程と同様の事象を用いて、 W' ボソンや、FCNC を含む生成過程に関する質量や生成断面積に対する制限も与えており[9]、さらなる制限の更新も期待できる。

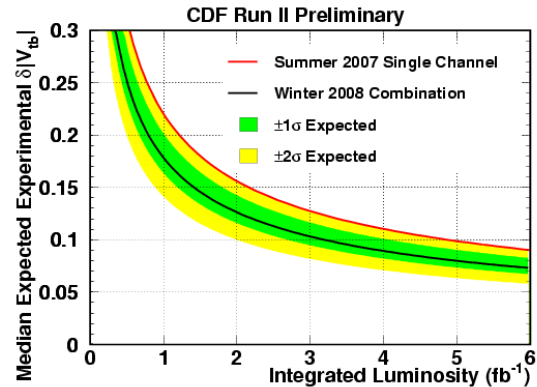


図 13 $|V_{tb}|$ 測定精度の予想曲線。帯は、 1σ および 2σ を示す。

7 おわりに

この業績の一部は、私の博士論文の研究として行われたものであるが、当然のことながら私ひとりで行ったわけではなく、当時指導教官だった金信弘先生と、共に解析をおこなった 38 人も CDF 実験シングルトップグループの研究者の協力なしでは達成できなかった。また、本実験は、米国フェルミ国立加速器研究機構の加速器運転および CDF 実験の運転に携わってこられた技術者、研究者の方々の協力が非常に大きい。

References

- [1] F. Abe *et al.*, Phys. Rev. Lett. **73**, 225 (1994).
F. Abe *et al.*, Phys. Rev. **D50**, 2966 (1994).
F. Abe *et al.*, Phys. Rev. Lett. **74**, 2626 (1995).
- [2] T. Aaltonen *et al.*, Phys. Rev. Lett. **103**, 092002 (2009).
- [3] D. Acosta *et al.*, Phys. Rev. Lett. **95**, 102002 (2005).
- [4] T. Aaltonen *et al.*, Phys. Rev. Lett. **102**, 042001 (2009).
- [5] T. M. P. Tait, C.-P. Yuan, Phys. Rev. **D63**, 014018 (2000).
- [6] T. Aaltonen *et al.*, Phys. Rev. Lett. **101**, 252001 (2008).
- [7] C. Amsler *et al.*, Phys. Lett. **B667**, 1 (2008).
- [8] L. Read, J. Phys. **G28**, 2693 (2002).
T. Junk, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. **A434** (1999).
P. Bock *et al.*, CERN-EP-98-046 (1998),
and CERN-EP-2000-055 (2000).
- [9] T. Aaltonen *et al.*, Phys. Rev. Lett. **102**, 151801 (2008).
T. Aaltonen *et al.*, Phys. Rev. Lett. **103**, 041801 (2008).