

2003平成15年4月

1998～2002年度研究成果報告書

研究課題名： 陽子・反陽子衝突による重い粒子の検出（CDF）

研究代表者： 筑波大学物理学系 教授 滝川紘治（1999年度まで）
筑波大学物理学系 教授 金 信弘（2000年度から）

研究参加機関名：

筑波大学物理学系，高エネルギー加速器研究機構，大阪市立大学理学部，
広島大学理学部，早稲田大学理工学総合研究センター，岡山大学理学部，
京都教育大学理学科，近畿大学理工学部，長崎総合科学大学工学部

目次

- 【1】 研究概要
- 【2】 研究目的
- 【3】 研究方法
- 【4】 研究実施状況
- 【5】 物理の成果
 - 1. トップクォークの物理
 - 2. B粒子の物理
 - 3. 電弱相互作用の物理
 - 4. 強い相互作用の物理
 - 5. 標準理論を超える物理
- 【6】 検出器増強
 - 1. プラグ電磁カロリメーターおよびプリシャワー検出器
 - 2. SVX シリコン・バーテックス検出器
 - 3. 中間部シリコン検出器（ISL）
 - 4. TOF カウンター
 - 5. データ収集システム
 - 6. Run b用シリコン検出器（SVX b）
 - 7. Run b用中央部プリシャワー検出器（CPR2）
- 【7】 今後の展望
- 【8】 自己評価
- 【9】 研究成果のリスト
 - 1. Publication
 - 2. Conference Talks
 - 3. Ph. D. Theses

【1】研究概要

CDF (Collider Detector at Fermilab) 実験の目的は、米国フェルミ国立加速器研究所の陽子・反陽子衝突器テバトロンにおいて、汎用型検出器 CDF により、トップクォークの物理、電弱相互作用の物理、ボトムクォークの物理、量子色力学の物理、ヒッグス粒子や超対称粒子の探索、新粒子・異常現象の探索などを行うことにある。

CDF 実験のこれまでの主な経緯を簡単にまとめると、1981 年 8 月に設計報告書を作成、1985 年 10 月にテバトロン加速器が稼働して重心系エネルギー 1.8 TeV の陽子・反陽子衝突に初めて成功、1987 年 1 月から 5 月に CDF 実験のテストランを行った後、1988 年 6 月から 1989 年 5 月にかけて第一回目の衝突実験を行って 4 pb^{-1} のデータを取得した。

検出器増強の後、1992 年 4 月から 1993 年 5 月にかけて衝突実験 Run a を行って 19 pb^{-1} のデータを取得、このデータを解析した結果、予想できるバックグラウンドでは説明できないトップクォーク候補事象を観測して、1994 年 4 月に「トップクォーク生成の証拠」を発表した。Run a に引き続き 1993 年 12 月から 1996 年 2 月にかけて行なわれた衝突実験 Run b では 86 pb^{-1} のデータを取得、Run b の途中までのデータを解析した結果、トップクォークが生成されていることを決定的に立証して 1995 年 2 月「トップクォークの観測」を発表した。

テバトロンにおける陽子・反陽子衝突で得られるデータは豊富な物理を含んでおり、トップクォークに限らず様々な物理について解析を行ってきたが、1998 年 3 月に、標準理論

で予言されている最後の間接子である B_c メソン (ボトムクォークとチャームクォークから成る) の存在を確認し、「 B_c メソンの観測」を発表した。また、 J/ψ (2s) の直接生成断面積の測定では、理論予測の 50 倍の測定値が得られ、これを説明するべく多くの理論家が Color Octet 模型などの新理論を提唱したが、現時点までこの不一致は理解できていない。

フェルミ研究所の加速器は主リング入射器の新設をはじめとする増強を完了し、2001 年春より衝突実験 Run a を開始した。Run a では、重心系エネルギーが 1.8 TeV から 2.0 TeV に上げられ、積算ルミノシティーは Run a の 20 倍の 2 fb^{-1} が期待される。加速器の増強に呼応して、CDF 検出器各部の増強が行なわれ、CDF 検出器は一新されて CDF 検出器となった。この新しい CDF 検出器の建設において、日本グループは、プラグ電磁カロリメーター、プラグ・プリシャワー検出器、シリコン・バーテックス検出器、中間部シリコン検出器、TOF カウンター、データ収集装置の開発製作を担当した。Run a では、トップクォークの質量の精密測定 ($M < 3\text{GeV}/c^2$) と生成・崩壊特性の精密測定、W ボソン質量の精密測定 ($M < 30 \text{ MeV}/c^2$)、ヒッグス粒子の探索 ($M_{\text{Higgs}} < 120\text{GeV}/c^2$ ならば 2 で検出)、B 中間子での CP 不変性の破れの検出、 B_c 中間子系での粒子反粒子振動の検出、高次 QCD 計算の検証、より広い質量範囲での新粒子の探索など多くの成果が期待される。

Run a の先には、ピーク・ルミノシティーが約 $4 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、積算ルミノシティーが 15 fb^{-1} の Run b が 2005 年 (平成 17 年) 頃から開始予定で計画されている。この Run

b の高ルミノシティは、反陽子ビームに新たに電子冷却法を適用して高強度にすることによって実現する。CDF 検出器の改造はシリコン飛跡検出器、中央ブリシャワー検出器などの小規模の改良を行う。Run b では、質量が $180 \text{ GeV}/c^2$ くらいまでのヒッグス粒子の探索が 3 で可能であり、超対称性粒子の探索範囲も広がる。LHC 実験と多少オーバーラップする 2009 年（平成 21 年）頃まで、素粒子物理の発展に寄与する貴重なデータを収集できるものと期待している。

以下では、第 2 節で研究目的を、第 3 節で研究方法を、第 4 節で研究実施状況を述べたあと、第 5 節で 1998 ~ 2002 年度の物理の成果を述べる。検出器増強については第 6 節で述べる。Run 以降の物理の展望については第 7 節に述べる。第 8 節で自己評価を述べ、末尾に研究成果のリストを載せる。

【2】研究目的

二十世紀後半の素粒子物理学は、「標準理論(The Standard Model)」と呼ばれる素粒子反応の基本理論の確立を最大の目標として発展してきた。標準理論は、(1)ゲージ不変性の原理、(2)電弱相互作用の自発的対称性の破れによる質量の生成、(3)素粒子(クォークとレプトン)の三世代の階層構造という三つの柱からなっている。このうち、第一のゲージ原理は、物質の構成要素であるクォークとレプトンというフェルミオン間の相互作用がゲージボソンと呼ばれるスピン 1 のボソンの交換によって起こることを明らかにした。その正しさは、弱い相互作用のゲージボソン W^+ , W^- , Z^0 と強い相互作用のゲージボソン(グルーオン)の加速器実験による発見に代表される数々の実験事実によって実証されている。一方、上記第三、フェルミオンの階層構造(世代)が、自然界の粒子と反粒子のアンバランスに重要な関わりがあるとする「小林・益川理論」については、文部省高エネルギー加速器研究機構(KEK)の B ファクトリーでその検証が着々と進んでいる。標準理論について未だ確認が得られていないのは、フェルミオンやボソンがなぜ質量を持っているのかを説明する自発的対称性の破れの(ヒッグズ機構とも呼ばれる)メカニズムである。「ヒッグス粒子の真空凝縮によってゲージボソン、クォーク、レプトンに質量が与えられる」という標準理論の質量起源に対する予言は未だ実験室で確認されていない。

CDF 実験で発見されたトップクォークは、6 種のクォークのうち最も重いものであり、その質量 $175 \text{ GeV}/c^2$ は金原子 1 個に相当するほど大きい。なぜ、このように重いクォー

クが存在するのか、この巨大な質量に意味があるのかないのか、あるとすればその理由は何なのかについて、我々素粒子物理学者は強い興味を抱いてきた。質量の起源が、標準理論の言う自発的対称性の破れのメカニズムにあるのか、それともこの理論の枠組みにおさまらない新理論にあるのか、これは今後の素粒子物理学の方向を決める最も重要な課題である。

標準理論においてはクォークやレプトンの質量は実験で決定されるべきパラメータである。標準理論は、これらフェルミオンの質量パラメータとして少なくとも9個、ニュートリノに質量があれば12個のパラメータを持っていることになる。これらのパラメータをアприオリに決定する原理すなわち標準理論よりいっそう基礎的な物理が存在するかどうか、あるとすればその新しい基礎理論の手がかりを得ることが、現代素粒子物理学の急務である。

これらの素粒子物理学の課題を解決する鍵となるものは、質量起源が自発的対称性の破れにあるならば、必ず存在しなくてはならないヒッグス粒子である。CDF実験Runの最大目的はヒッグス粒子の直接探索とトップクォーク・Wボソンの質量の精密測定によるヒッグス粒子の質量の間接測定である。2007年に予定されているヨーロッパCERN研究所のLHCハドロン衝突型加速器が稼働するまではテバトロン加速器が唯一この研究を行うことができる加速器である。

また、フェルミオンの中で最も重いトップクォークの生成崩壊を精密測定することは、質量起源に対する新しい知見を得る手がかりを与えるかもしれない。CDF実験Runはトップ・ファクトリーとしてトップクォークの質

量と生成崩壊特性の測定を行い、その手がかりを追求する。

ハドロンコライダーはBハドロン生成断面積が大きいという利点を生かして、Bの物理を行う。特に、電子陽電子衝突によるBファクトリー(BELLE, BABAR)ではできないB中間子系の粒子反粒子振動の検出などを行うことによって、「小林・益川理論」の検証に寄与する。

以上のヒッグス粒子の探索、トップクォークの物理、Bの物理以外にも電弱相互作用、QCDの解析を行い、標準理論のより精密な検証を行う。また超対称性粒子をはじめとする標準理論を超えた新粒子の探索を行う。

CDF実験Runの素粒子物理学研究は、素粒子物理学と密接な関係にある宇宙物理学にも大きな影響を与える。150億年前に、ビッグバンから始まった宇宙の進化の過程を理解するのに、粒子の質量起源の解明は必須である。宇宙が、なぜ今の宇宙でありえたのか。フェルミオンの質量パラメータがなぜ現在の数値になっているのか。この問題の答えは、素粒子物理学のさらなる進展なしにはあり得ない。この答えを出すのに貢献することも本研究の目的のひとつである。

【3】研究方法

1992年から1996年にかけて行なわれた陽子・反陽子衝突実験 Run では約 110 pb^{-1} のデータを収集し、トップクォークの発見、トップクォーク・W ボソン質量の精密測定、 B_c 中間子の発見をはじめとする B 粒子の生成・崩壊特性の測定、ジェット生成特性の測定など多くの成果をあげてきた。Run の物理解析は平成 15 年度中に終了する。

2001 年春に開始した衝突実験 Run a で収集されたデータの解析を行なう。検出器の性能の理解を完了し、解析用ソフトウェアの開発を推進しながら、検出器を維持運転し、Run a のデータ収集を継続する。日本グループは、製作を担当した検出器増強部（プラグ・カロリメータ、シリコン・バーテックス検出器 SVX、中間部シリコン検出器 ISL、データ収集・モニター装置、TOF カウンター）の調整・運転を責任を持って行う。

検出器の運転、データの収集と並行して、検出器のキャリブレーションを行い、物理の解析を進める。日本グループが現在解析を進行中のものとして以下の物理解析が挙げられる。

- (1) トップクォークの質量
- (2) トップクォークの生成崩壊特性
(トップ偏極相関を含む)
- (3) B_s 中間子系の粒子反粒子振動
- (4) B ハドロンの質量・寿命
- (5) W 生成断面積 (WW 結合)
- (6) ヒッグス粒子の直接探索
- (7) 超対称性粒子をはじめとする新粒子の探索

2005 年 (平成 17 年) から 開始予定のさら

なる高輝度での衝突実験 Run b の準備として放射線耐性の高いシリコン検出器の製作、中央部プリシャワーカウンターの製作など、CDF 検出器の増強を継続する。日本グループは、高放射線耐性シリコン検出器 (SVX b) に用いるシリコン・センサーと高集積信号ケーブルの開発製作を担当している。また中央部プリシャワーカウンター (CPR2) については、マルチアノード光電子増倍管の製作・品質管理・長期安定性テストを担当している。これら Run b 用の検出器増強部は、平成 17 年度内に Run a を終了して、CDF 検出器に設置する。

平成 17 年に衝突実験 Run b を開始し、データ収集、及びデータ解析を行う。物理解析については、トップクォーク・W ボソンの質量の精密測定によるヒッグス粒子の質量の間接測定と、ヒッグス粒子の直接探索を最重要課題として解析を推進する。

【4】研究実施状況

CDF 実験は、日本、米国、イタリアの国際協同実験として開始され、その後、カナダ、台湾、スイス、ドイツ、英国、韓国、ロシアが加わっている。日本グループは、1979年から始まった日米科学技術協力事業「陽子・反陽子衝突による重い粒子の検出（CDF）」のもと、計画を推進してきた。当初から1995年度まで、近藤都登（筑波大学物理学系）が研究代表者を務めてきた。1996～1999年度は滝川紘治（筑波大学物理学系）が務め、2000年度からは金信弘（筑波大学物理学系）が研究代表者を務めている。

CDF 日本グループにとって、1998～2002年度は、衝突実験 Run のデータ解析、Run に向けての検出器増強、Run aのデータ解析などで、実り多い5年間であった。CDF のデータ解析は、Top、B、Electroweak、QCD、Exoticの5つのグループに分かれて行なわれているが、日本グループは全てのグループに参加し、第5節で述べるように多くの成果を挙げた。CDF 検出器の建設では、日本グループはブラグ電磁カロリメーター、ブラグ・プリシャワー検出器、シリコン・バーテックス検出器、中間部シリコン検出器、TOF カウンター、データ収集装置と重要なコンポーネントを担当し、建設・設置を完了した後、現在運転中である。

Run aは2001年3月に開始し、2003年3月に $4.1 \times 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ というRun で達成した2倍の最高ルミノシティを記録した。また2003年3月までに積算ルミノシティ 140 pb^{-1} のデータ（これはRun で収集されたデータ量 110 pb^{-1} を越えた）を収集した。これらのデータを用いて運動量・エネルギー

ケールの決定をはじめとする検出器のキャリブレーションを行なった。これらの較正係数を用いて物理解析が進行中である。

日本グループはRun b用のシリコン飛跡検出器と中央プリシャワー検出器を担当し、その建設を現在進めている。表4.1に示す研究者組織でこれらの検出器の建設にあたった。1998～2002年度の予算（校費）の実施状況を表4.2に示す。旅費の実施状況は表4.3に示す。

表 4.1 検出器増強における日本グループの組織

項目	担当責任者,	担当グループ
プラグ電磁カロリメーター・ プリシャワー検出器	清矢良浩,	筑波大, KEK, 早稲田大
シリコン・パーテックス検出器	岩田洋世,	広島大, 岡山大, 京都教育大
中間部シリコン検出器	原和彦, 奥沢徹,	筑波大, 大阪市立大, 近畿大
TOF カウンター	受川史彦,	筑波大
データ収集・モニター装置	下島真, 宮本彰也,	KEK, 筑波大, 早稲田大, 長崎総合科学大
Run bシリコン飛跡検出器	原和彦, 中野逸夫,	筑波大, 岡山大
Run b中央プリシャワー検出器	受川史彦,	筑波大

表 4.2 平成10年度から14年度の校費の実施状況. 単位: 千円.

平成 JFY	10年度 1998	11年度 1999	12年度 2000	13年度 2001	14年度 2002	合計
プラグ	14,850	28,450	46,950	5,000	2,000	97,250
SVX	45,940	60,320	19,500	5,000	2,000	132,760
ISL	73,410	63,000	48,500	5,000	2,000	191,910
DAQ	0	14,600	42,550	57,500	45,000	159,650
SVX b	0	0	0	52,000	70,500	122,500
CPR2	0	0	0	0	6,000	6,000
小計	134,200	166,370	157,500	124,500	127,500	710,070
計算機・回線運転 維持	11,400	8,500	8,500	8,500	8,500	45,400
データ解析	8,400	9,130	18,000	50,000	28,000	113,530
フェルミ研経費	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	30,000
小計	25,800	23,630	32,500	64,500	42,500	188,930
合計	160,000	190,000	190,000	189,000	170,000	899,000

表 4.3 平成10年度から14年度の旅費の実施状況. 単位: 千円.

平成 JFY	10年度 1998	11年度 1999	12年度 2000	13年度 2001	14年度 2002	合計
旅費	11,000	11,000	12,000	13,000	13,000	58,000

【5】物理の成果

1. トップクォークの物理

トップクォークの存在が、1995年に確立してから、トップクォークの物理に関する課題は、トップクォークの特性(質量, 生成断面積, 崩壊様式等)の測定に移行した。なかでもトップクォークの質量は、素粒子の標準模型での様々な計算において重要なパラメータとなっている。これを精度良く求めることは、この10年間の物理の最重要テーマの一つであると言える。以下1998年度から2002年度までにおけるCDFでのトップクォークの物理解析の成果について述べるとともに日本グループの貢献についても言及する。

Run の結果

トップクォークの質量・生成断面積

1997年度末までに質量, 生成断面積の測定は、トップクォーク対の主な三つの崩壊様式であるレプトン+ジェット, ダイレプトン, 全ジェット・チャンネルにおいて行なわれており, 1998年以降は, 主に解析手法の改良による測定精度の向上がなされた。ダイレプトン・チャンネル(トップクォーク対の両方がレプトンを含む崩壊をするチャンネル)においては, 消失粒子であるニュートリノが二つ存在するため, 厳密な意味でのトップクォーク質量の再構成は不可能となる。これに関し, 日本グループの近藤が提唱する「力学的尤度法」[1]などをもとにしてダイレプトン・チャンネルでの質量測定法が開発された。この手法を用いたダイレプトン・チャンネルでのトップクォークの質量の測定が行われ, 他のチ

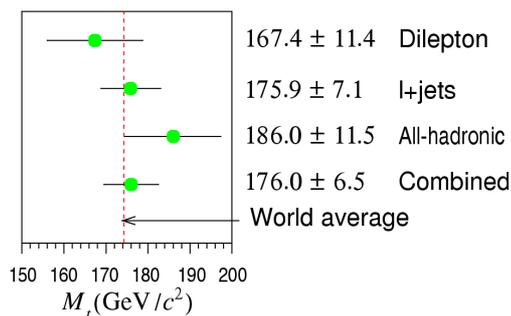


図 1.1: トップクォークの質量の測定結果。

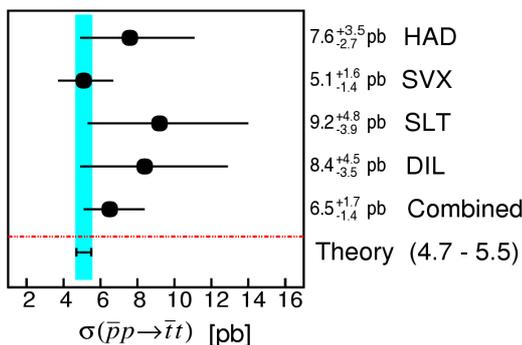


図 1.2: トップクォーク対の生成断面積の測定結果および理論予想。

ャンネルでの解析結果ともあわせてCDFでのトップクォークの質量の測定の最終結果が2001年に報告された[2]。図1.1に各崩壊チャンネルでの質量の測定結果および, それらを統計的手法により, 一つの結果としてまとめたものを示す。

トップクォーク対の生成断面積も1998年以降解析手法の改良が進み, 最終的な結果は2001年に報告された[3]。図1.2に各チャンネルでの生成断面積の測定結果および理論予想を示す。

トップクォークの単一生成の断面積

テバトロン加速器では, 強い相互作用によるトップクォーク対生成の他に電弱相互作用によるトップクォークの単一生成がある。これは, その生成断面積に小林・益川行列の要素である V_{tb} に関する情報を含んでおり, 八

ドロンコライダーで直接 $|V_{tb}|$ を測定する唯一の方法として知られている。Run 1 では、筑波大のグループがこのトップクォーク単一生成の探索に中心的な役割を果たし、1999 年に生成断面積の上限値として 95% の確度で 18.6pb を得た[4]。図 1.3 にトップクォークの単一生成の候補事象について最構成されたトップクォークの質量の分布を示す。この結果報告は、これと独立な解析と合わせて 2002 年に出版された[5]。Run a では、有意な事象数が観測され生成断面積が得られると期待される。

その他の成果

上記以外で Run1 において 1998 年度から 2002 年度までに得られたトップクォークの物理的成果には、

- トップクォークの崩壊における W ボソンの偏極度測定[6]。

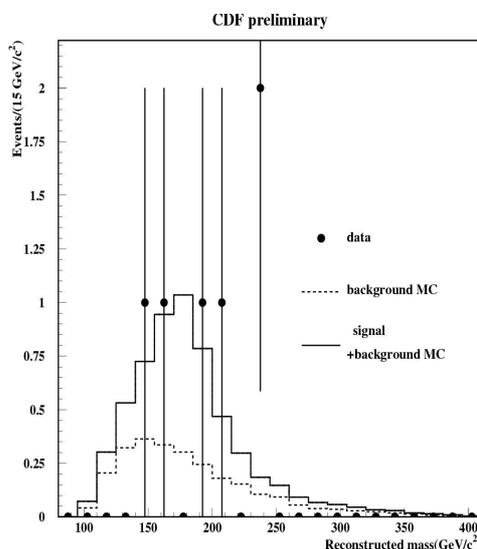


図 1.3: 単一トップクォーク生成の候補事象における再構成されたトップクォークの不变質量分布(ドット)および、それに対する信号+バックグラウンドの最適フィット結果(ヒストグラム)。

- トップクォークが W ボソンとボトムクォークに崩壊する分岐比の測定[7]。
 - トップクォーク対の不变質量の分布による新粒子探索[8]。
 - トップクォークの横方向運動量分布測定[9]。
- などがある。

Run a の結果

Run a での質量・生成断面積

Run a では、現在のところ 2002 年度末までに収集されたデータのうち積分ルミノシティーで約 70 pb^{-1} 相当のデータが解析に使用され、最優先課題として質量・生成断面積の測定がおこなわれている。今までのところ Run a において、以下のような成果があがっている。

- レプトン+ジェット・チャンネルを用いたトップクォーク対の生成断面積の測定。
- ダイレプトン・チャンネルを用いたトップクォーク対の生成断面積の測定。
- レプトン+ジェット・チャンネルを用いたトップクォークの質量の測定。

このうちレプトン+ジェット・チャンネルの生成断面積の測定において重要な要素である

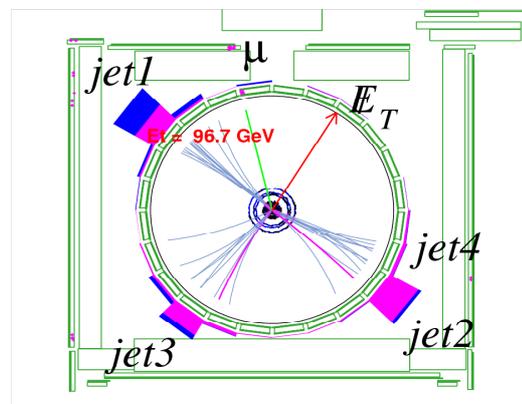


図 1.4: Run a でのレプトン+ジェット・チャンネルの候補事象。

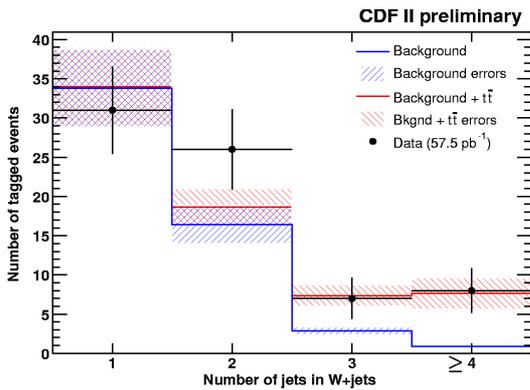


図 1.5: レプトン+ジェット・チャンネルにおける候補事象数をジェットの数の関数としてプロットしたもの。

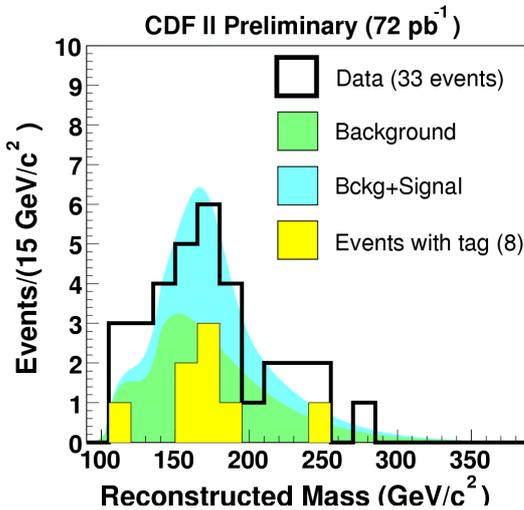


図 1.6: レプトン+ジェット・チャンネルの候補事象において再構成されたトップクォークの質量の分布。

検出器のアクセプタンス計算において日本グループが大きく貢献した。図 1.4 に Run a で得られたレプトン+ジェット・チャンネルの候補事象を示す。図 1.5 にレプトン+ジェット・チャンネルにおける候補事象数を事象の中のジェットの数の関数として表したものを示す。ジェットの数が 3 以上が信号領域であり期待されるバックグラウンド事象数が 3.8 ± 0.5 のところ 15 事象が観測された。これにより得られた生成断面積は、

$$t\bar{t} = 5.3 \pm 1.9_{\text{stat}} \pm 0.8_{\text{syst}} \text{ pb}$$

であった。他にもダイレプトン・チャンネルからは、生成断面積の測定結果として

$$t\bar{t} = 13.2 \pm 5.9_{\text{stat}} \pm 1.5_{\text{syst}} \text{ pb}$$

が得られている。これらは、Run I の結果および理論予想とも矛盾しない結果であった。

図 1.6 は、レプトン+ジェット・チャンネルの候補事象において再構成されたトップクォークの質量の分布を示す。この分布からトップクォークの質量として

$$M_{\text{top}} = 171.2 \pm 13.4_{\text{stat}} \pm 9.9_{\text{syst}} \text{ GeV}/c^2$$

という測定結果を得た。これは、Run I での測定結果と誤差の範囲で一致している。

参考文献

- [1] K. Kondo et al., J. Phys. Soc. Japan. 62, 1177 (1993).
- [2] T. Affolder et al., Phys. Rev. D63, 032003 (2001).
- [3] T. Affolder et al., Phys. Rev. D64, 032002(2001).
- [4] 菊地俊章(筑波大学) 博士論文(1999), Search for Single Top Quark Production in 1.8-TeV Proton-Antiproton Collisions.
- [5] D. Acosta et al., Phys. Rev. D65, 091102 (2002).
- [6] T. Affolder et al., Phys. Rev. Lett. 84, 216-221 (2000).
- [7] T. Affolder et al., Phys. Rev. Lett. 86, 3233-3238 (2001).
- [8] T. Affolder et al., Phys. Rev. Lett. 85, 2062-2067 (2000).
- [9] T. Affolder et al., Phys. Rev. Lett. 87, 102001 (2001).

2. B 粒子の物理

陽子・反陽子衝突においては強い相互作用により b クォークが対生成されるため、B 粒子の生成率は電子・陽電子衝突によるものと比較して 4 桁程度高い。それを効率よく収集することが出来れば、B 粒子の生成・崩壊特性の詳細な研究が可能となる。以下、CDF 実験における B 粒子の物理について、日本グループの貢献を中心に述べる。

Run I の結果

B 中間子の寿命の精密測定

B 粒子は弱い相互作用により崩壊するが、1980 年代前半にその寿命が初めて測定され、およそ 10^{-12} 秒 (ps) であることがわかった。チャーム・クォークを含む中間子 (D 中間子) の寿命には、その荷電状態により 2.5 倍の差があるが、B 中間子においては高々数%の違いしかないと言われている。CDF 実験での B 中間子寿命の測定のひとつにそのセミレプトニック崩壊 $B \rightarrow l \nu D$ を利用したものがある。D 中間子の種により親の B 粒子の種を判別する。シリコン飛跡検出器を用いて崩壊点を測定し、終状態の運動量の測定と組み合わせて B 中間子の固有崩壊時間を求め、その分布より寿命を決定した。図 2.1 に固有崩壊長の分布を示す。これにより、荷電および中性 B 中間子の寿命とその比が

$$\tau(B^+) = 1.637 \pm 0.058 \pm 0.033 \text{ ps}$$

$$\tau(B^0) = 1.474 \pm 0.039 \pm 0.052 \text{ ps}$$

$$\tau(B^+)/\tau(B^0) = 1.110 \pm 0.056 \pm 0.033$$

と測定された [1]。

中性 B 中間子の粒子・反粒子振動

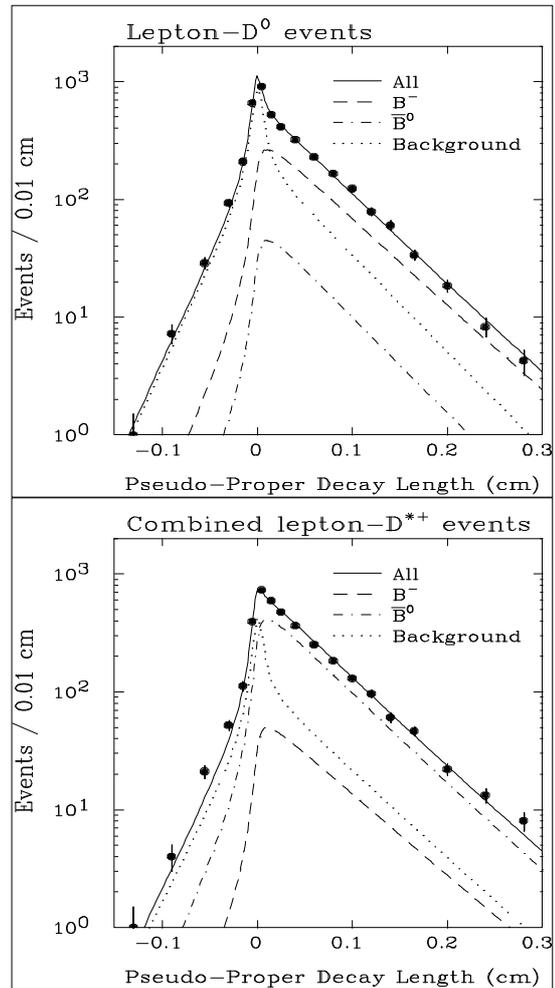


図 2.1 : B 中間子のセミレプトニック崩壊事象の固有崩壊長分布 (上: 荷電 B 中間子崩壊, 下: 中性 B 中間子崩壊の事象)。

B^0 中間子およびその反粒子 \bar{B}^0 は強い相互作用の固有状態であるが、崩壊時には弱い相互作用 (質量・寿命) の固有状態 B_H^0 と B_L^0 で考えるのが適当である。 B^0 あるいは \bar{B}^0 として生成された粒子には、時間の発展とともにそれぞれの反粒子成分が現れ、互に移り変わる。この現象を粒子・反粒子振動と呼び、その角振動数は B_H^0 と B_L^0 との質量差 Δm に等しい。また、中性 B 中間子の粒子・反粒子振動は、その中間状態にトップクォークを含むため、質量差 Δm は小林・益川行列の要素 V_{td} (あるいは V_{ts}) の大きさの 2 乗に比例する。

B^0 中間子の粒子・反粒子振動の測定には崩壊時間の測定の他に、生成時に B^0 中間子であったのかその反粒子であったのかを判別する操作が必要である。これをフレーバー同定と呼ぶ。CDF 実験ではいくつかの B^0 中間子崩壊様式とフレーバー同定法を組み合わせる振動数 Δm の測定を行った。その一例を図 2.2 に示す。この測定では B^0 中間子をセミレプトニック崩壊 $B^0 \rightarrow l^+ \nu D^+ X$ を用いて再構成し、事象中の 2 番目のレプトンを用いてフレーバー同定を行った。図 2.2 は、生成時と同一および異なるフレーバーで崩壊した事象数の間の非対称度を固有崩壊時間の関数として示したものである。振動数は

$$\Delta m = 0.516 \pm 0.099 \pm 0.035 \text{ ps}^{-1}$$

と測定された[2]。

CP 対称性の破れの探索

小林・益川理論によれば、 B 粒子のある種の崩壊においては、その崩壊率に大きな CP 対称性の破れが生じると予想されてきた。特に、中性 B 中間子の崩壊 $B^0/\bar{B}^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$ は理論

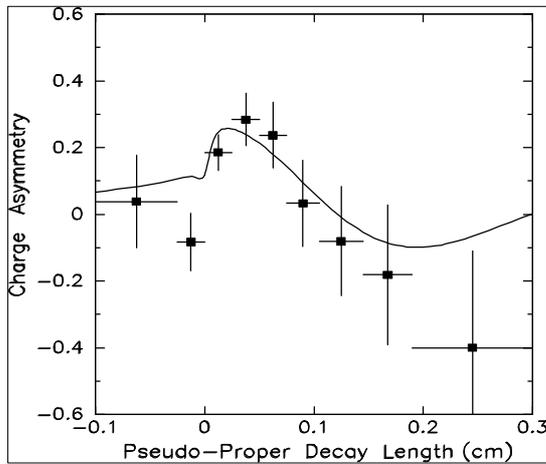


図 2.2: B^0/\bar{B}^0 振動の固有崩壊長依存性。

的解釈が容易であり、実験的にも再構成し易いという利点を持つ。CDF 実験では Run 1 のデータ中に約 400 事象の上記崩壊が観測された。その崩壊率の粒子・反粒子間での非対称度を図 2.3 に示す。この測定により、ユニタリ三角形の角度 β を

$$\sin(2\beta) = +0.80 \pm 0.40$$

と決定した[3]。その後、Belle および BaBar 実験での測定により、 B 中間子系での CP 対称性の破れは確立された。

B_c 中間子の観測

B_c 中間子は二つの異なる種類の重いクォークの束縛状態であり、他に類を見ない粒子である。CDF 実験では Run 1 のデータを用いてその探索を行った結果、そのセミレプトニック崩壊 $B_c^+ \rightarrow J/\psi l^+ \nu X$ の観測に成功し[4]、その生成率・分岐比の $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+$ に対する比を $0.132 \pm 0.041 \pm 0.031 \pm 0.032$ と決定した(図 2.4)。

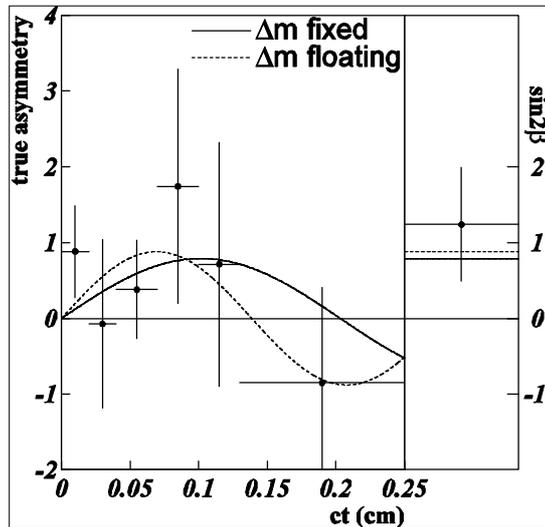


図 2.3: $B^0/\bar{B}^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$ 崩壊における崩壊率の粒子・反粒子間の非対称度の固有崩壊時間依存性。

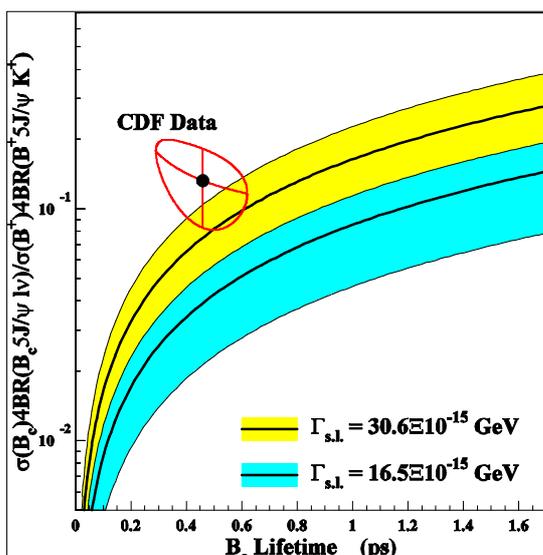


図 2.4: B_c^+ 中間子と B^+ 中間子の生成率との比 .

B 粒子の中性流による稀崩壊の探索

b s のようなクォークの種類を変える中性流 (FCNC) による崩壊は tree level では厳密に禁止されるが, 高次の過程では可能である. B 粒子の FCNC による崩壊 $B \rightarrow K^* \gamma$ は CLEO 実験により初めて観測された. CDF 実験でもこの種の崩壊を探索した. 特に, 光子が検出器物質中で電子・陽電子対に変換した事象を用い, B 粒子再構成の質量分解能の向上を図り, 分岐比に対する上限

$$BR(B_s^0 \rightarrow \phi \gamma) < 1.6 \times 10^{-4} \text{ (90\% CL)}$$

などを得た [5] .

Run a の結果

Run 実験までの CDF での B 粒子再構成は, その崩壊過程で生成したレプトンをトリガーすることにより達成された. Run 実験ではこれに加えて, シリコン飛跡検出器の情報をトリガーの第 2 段階で用いる装置 (SVT) が導入され, 長寿命粒子 (B 粒子, D 粒子) の崩壊点

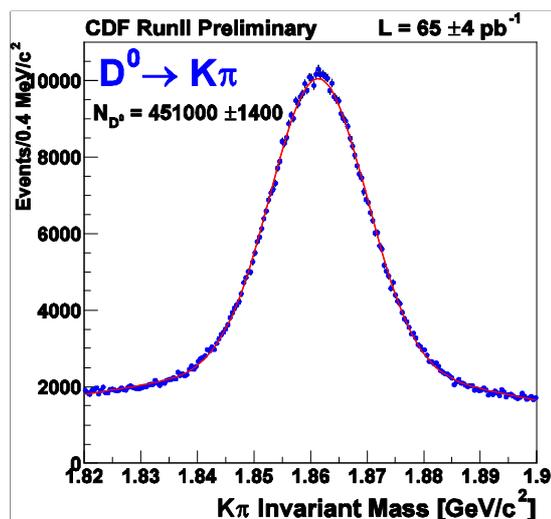


図 2.5 : SVT で収集したデータ中の $D^0 \rightarrow K^* \pi^+$ 崩壊の信号 .

で生成した粒子を効率よく収集することが可能となった. SVT により収集されたデータ中の D 中間子信号の例を図 2.5 に示す. この例では 65 pb^{-1} のデータ中に 450 k 事象という膨大な統計量の $D^0 \rightarrow K^* \pi^+$ 崩壊が再構成されており, チャーム粒子の物理は CDF 実験での新たな研究対象となった. すでに D^0 中間子の FCNC による崩壊の $D^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ の探索が行われ, その分岐比の上限値

$BR(D^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) < 2.4 \times 10^{-6}$ (90% CL) が得られている. これは 2002 年版の PDG の値 4.1×10^{-6} を上回るものである .

Run a 実験での目標のひとつは B_s^0 中間子の粒子・反粒子振動を観測することである. 期待される振動数は 18 ps^{-1} 程度と大変高いため, その固有崩壊時間を精度よく決定するために, 終状態の運動量をすべて再構成できる崩壊様式 $B_s^0 \rightarrow D_s^- \pi^+$ を用いる. この崩壊様式の信号および同様の様式 $B_d^0 \rightarrow D^- \pi^+$ を図 2.6 に示す. いずれも SVT を利用して収集されたものである .

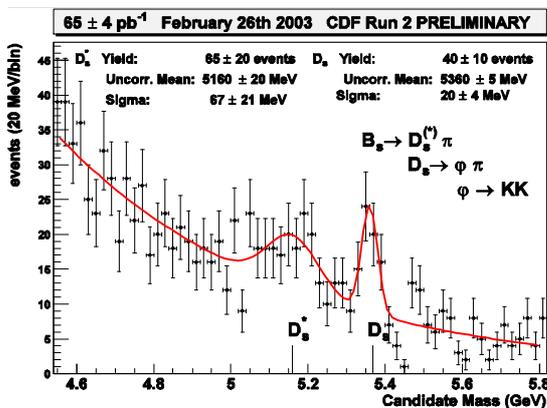
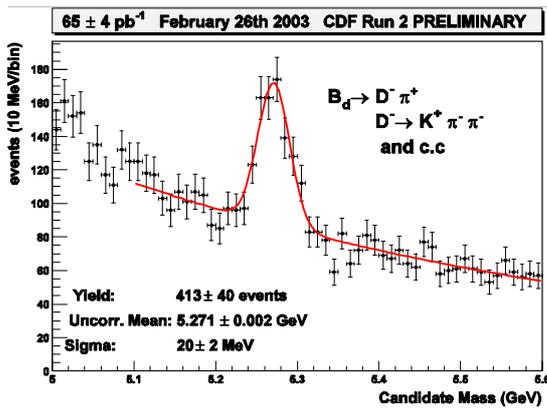


図 2.6 : SVT で収集したデータ中の B 中間子の信号。(上) $B_d^0 \rightarrow D^- \pi^+$, (下) $B_s^0 \rightarrow D_s^+ \pi^-$.

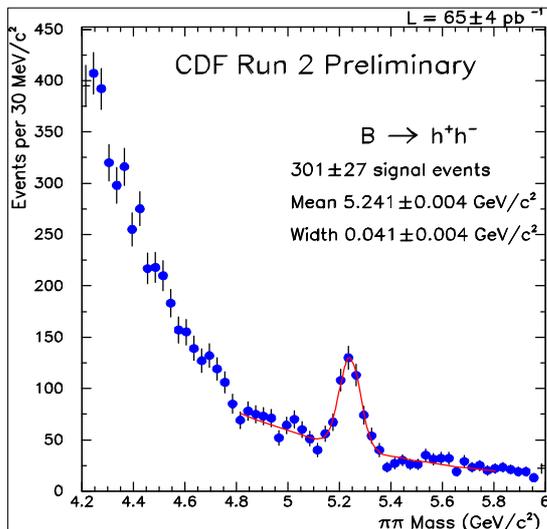


図 2.7 : $B_d^0 / B_s^0 \rightarrow h^+ h^-$ の信号。

この他にも, 中性 B 中間子の軽いハドロン ($h = K, \pi$) への二体崩壊も再構成されている (図 2.7)。この信号は $B_d^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$, $B_d^0 \rightarrow K^+ \pi^-$,

および $B_s^0 \rightarrow K^+ K^-$, $B_s^0 \rightarrow K^- \pi^+$ の重ね合わせである。この組成を中央飛跡検出器の dE/dx 測定を用いて決定し, それぞれの様式における CP 対称性の破れを測定する。

レプトンを用いたトリガーは従来通り用いられている。 $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ の信号を図 2.8 に示す。これを用いて, $B^0 \rightarrow J/\psi K_s^0$ などの様式での B 粒子の全再構成がなされている。

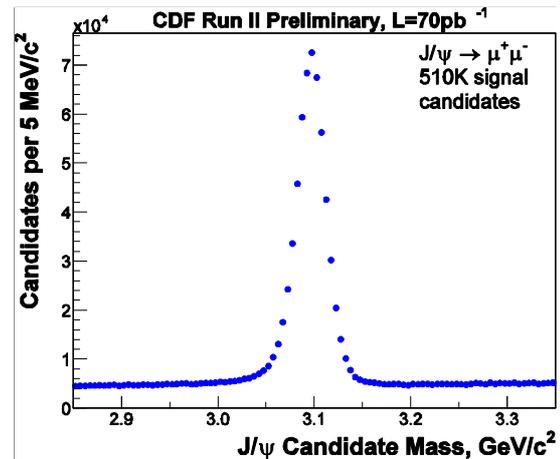


図 2.8: Run II データの $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ の信号。

参考文献

- [1] F. Abe et al., CDF Collaboration, Phys. Rev. D 58, 092002 (1998).
- [2] 桑原朋子 (筑波大学) 博士論文(1997), Measurement of Time Dependent $B^0 \bar{B}^0$ Mixing in 1.8 TeV Proton-Antiproton Collisions; T. Affolder et al., CDF Collaboration, Phys. Rev. D 60, 112004 (1999).
- [3] T. Affolder et al., CDF Collaboration, Phys. Rev. D 61, 072005 (2000).
- [4] 鈴木潤一 (筑波大学) 博士論文(1998), Observation of the B_c meson in 1.8-TeV Proton-Antiproton Collisions; F. Abe et al., CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. 81, 2431 (1998);

F. Abe et al., CDF Collaboration,
Phys. Rev. D 58, 112004 (1998).

[5] 田中雅士 (筑波大学) 博士論文(2001) ,
Search for Radiative B-hadron Decays with
the Collider Detector at Fermilab ;

D. Acosta et al., CDF Collaboration,
Phys. Rev. D 66, 112002 (2002).

3. 電弱相互作用の物理

テバトロンは、LEP 実験が開始されるまでは、W に関する電弱物理を研究できる事実上唯一の加速器であった。LEP グループが W ボソン質量の精密測定を行い実験を終了した後は、W ボソンの質量や崩壊巾等の精密測定を継続する一方で、W ボソンを用いて QCD の検証やパートン分布関数の測定なども合わせて行っている。以下、日本グループの貢献を主として、CDF の電弱相互作用の結果をまとめる。

Run b の結果

W ボソンの質量

標準模型における重要なパラメータである W ボソンの質量を、W e , μ 崩壊モードを用いて測定した[1]。データ解析ではレプトンの横運動量とニュートリノ生成にともなう消失横エネルギーから W の横質量 M_T を求める。この M_T 分布と W ボソンの質量を変数としたシミュレーション分布とを比較することで、最適の W ボソンの質量を決定した Run b では、e モード 30115 事象、 μ モード 14740 事象の W 崩壊を観測し、両方のモードを合わせて $80.470 \pm 0.089 \text{ GeV}/c^2$ の結果を得た。図 3.1 は μ モードでの横質量分布である。以前のデータと統合した CDF の結果は $80.433 \pm 0.079 \text{ GeV}/c^2$ である。

CDF の測定誤差は LEP の各実験の誤差 (ALEPH の $77 \text{ GeV}/c^2$ が最小)と同程度である。主な系統誤差はレプトンのエネルギー絶対値の不確かさであるが、これは今後データ量を増やすことで小さくなることが期待される。

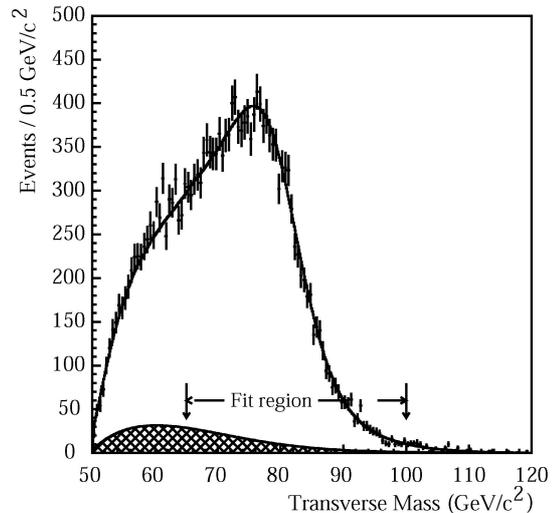


図 3.1: W 横質量分布 (W μ モード)

W ボソン横運動量

W 粒子の横運動量を測定することで、 P_T が小さな領域での非摂動 QCD の検証を行い、高い領域では摂動的 QCD との比較を行った[2]。低 P_T 領域 ($20 \text{ GeV}/c$ 程度以下)でのグルーオン resummation には、 P_T 空間で行う方法と b 空間 (P_T のフーリエ変換値)で行う方法が知られている。CDF の結果は図 3.2 に示すよう

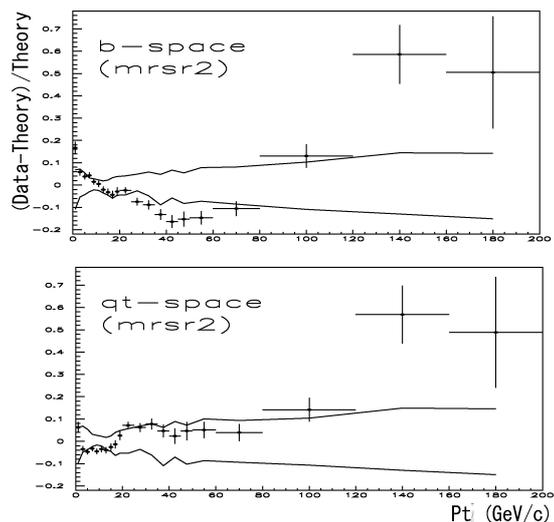


図 3.2: W 横運動量分布の理論予想とのずれ。理論予想は 2 本の曲線に囲まれた領域。(上) b 空間,(下) P_T 空間でグルーオン resummation を行った。

にどちらの方法とも矛盾しない。 P_T が高い領域 (80GeV/c 程度以上) では統計的に有意とは言えないが、NLO QCD の予想とやや異なる傾向を示した。

W および Z 生成断面積と W 崩壊巾

Run データによる W や Z 粒子の生成断面積の測定結果を発表した[3], [4]。電子崩壊, μ 粒子崩壊モードともに NNLO による QCD 計算値と良く一致している。

W や Z 個別の生成断面積は、パートン分布関数, f_s , QCD 計算上の不定性, ルミノシティの不定性などが大きい, 両者の比をとることで多くの不定性が相殺できる。その比から W の崩壊巾を求めた。W e への崩壊分岐比は $10.39 \pm 0.30\%$ を得た。標準模型の W e 崩壊巾の値を用いると W の全崩壊巾は $2.179 \pm 0.062 \text{ GeV}^2/\text{c}^2$ になる。この結果は W の横質量 M_T 分布から直接求めた値[5] $2.055 \pm 0.125 \text{ GeV}^2/\text{c}^2$ と矛盾なく, 標準模型の値 $2.093 \pm 0.002 \text{ GeV}^2/\text{c}^2$ に 1.5 σ で合っている。

W 崩壊の電荷非対称性

標準模型の V - A 結合により, W は電荷に依存して崩壊する方向に特徴的な分布を示す。V - A 結合を仮定することで, W 生成に関する陽子中のパートン分布関数 (PDF) の知見を得

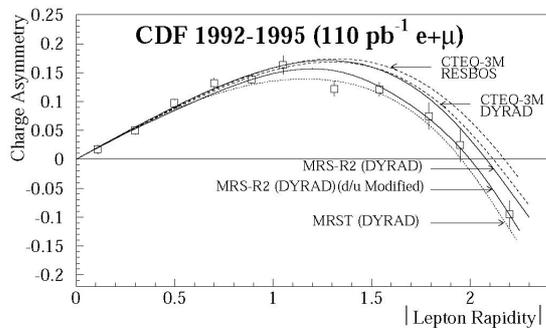


図 3.3: W 崩壊レプトンの電荷非対称性

ることができる。特に u/d クォークの分布比に敏感で, この測定は PDF に最も厳しい制限を与えることができる。

シリコン検出器を用いて電荷を決定することで前方領域まで電荷非対称性を測定した [6]。図 3.3 に示すように従来の u/d クォーク分布に修正が必要であることが分った。

Drell-Yan/Z 崩壊の前後方非対称性

標準模型では γ や Z を媒介として電子・陽電子対が生成される。両者の寄与は不変質量に依存し, 顕著な前後方非対称性を示す。図 3.4 は電子・陽電子対の不変質量の関数として前後方非対称性を示したもので, NLO QCD の予測カーブと比較している [4]。標準模型を超える中性ボソンが存在すれば振舞いが異なるが, その傾向は見当たらない。

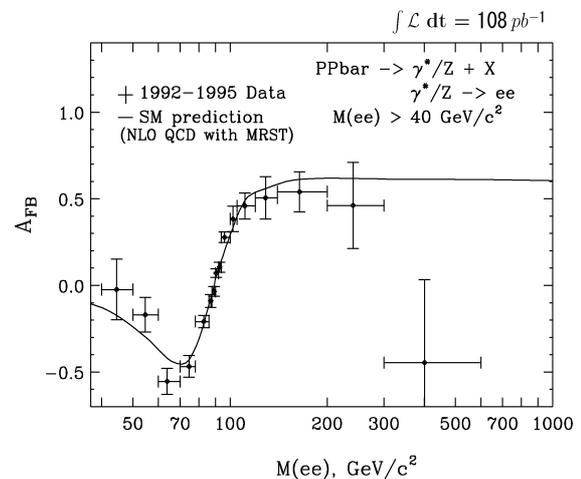


図 3.4: 電子・陽電子対の前後方非対称性

W 対生成断面積

W 対生成の測定は, W 粒子のゲージ性の検証に重要であり, すでに両方の W がレプトンに崩壊するダイレプトン・チャンネルでは生成断面積が測定され, 理論と一致することがわかっていてる。W 対生成は, ヒッグス粒子を H WW モードで探索する際にはバックグラウン

ドとなるため、ジェットを含むモードでの理解も不可欠となる。片方の W をレプトン崩壊モードで、他方をハドロン崩壊で同定する W (レプトン)+W(ジェット)チャンネルはダイレプトン・チャンネルに比べて分岐比が大きいので、H WW 探索に用いることができれば、探索効率の向上が可能となるが、このチャンネルでは W+QCD ジェットのバックグラウンドが多い。ジェットのさまざまな情報を用いてこのバックグラウンドを低減する研究を行った[7]。図 3.5 は W+ud ジェットの尤度を WW と W+QCD の場合で比較している。W+cs ジェットの分布の違いも用いて、RunI のデータから WW 生成断面積の上限 61 pb(95%信頼度)を求めた。これはレプトン対から求めた $10.2^{+6.3}_{-5.1}$ (stat) \pm 1.6 (syst) pb と矛盾しない結果である。

ヒッグス粒子の探索

標準模型で唯一未確認の粒子であるヒッグス粒子を、W/Z と随伴生成されるチャンネルで探索した。LEP の与える質量下限値の辺りでは、ヒッグス粒子は主に b クォーク対に崩

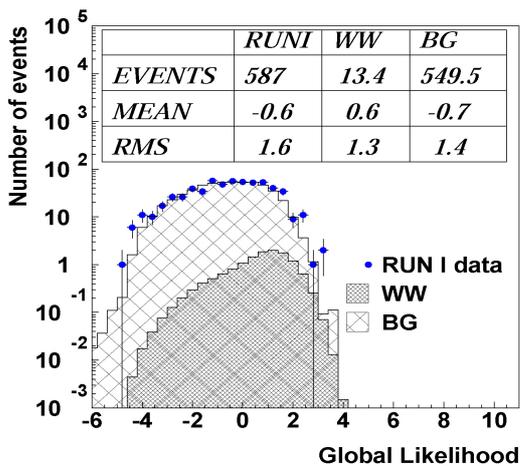


図 3.5: WW とバックグラウンドの尤度分布

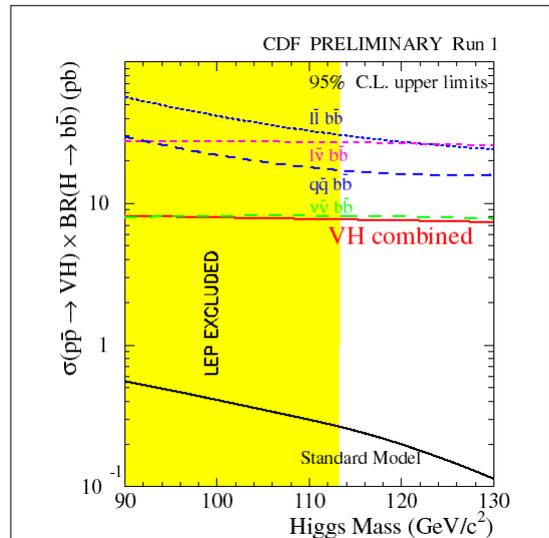


図 3.6: 標準ヒッグス粒子の探索結果。

壊する。W/Z 粒子を様々な崩壊モードで同定し、b クォークジェットを 2 つ捕らえることで、図 3.6 に示す結果を得た。標準模型ヒッグスの信号を検出するには信号量が 1 桁以上足らず、実際に信号候補事象はすべてバックグラウンドで説明できるものであった。

Run a の結果

W および Z 生成断面積

Run a での W/Z 生成断面積の測定結果を他の陽子・反陽子衝突実験の結果、理論予測(曲線)と合わせて図 3.7 に示す。全体的に極

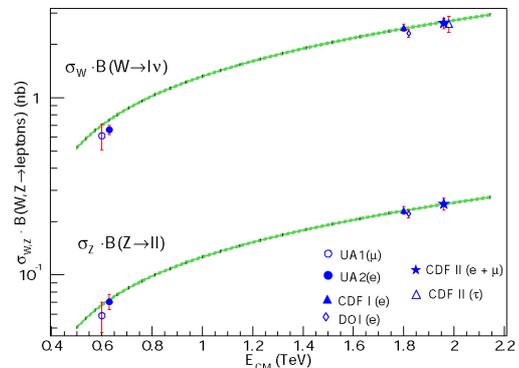


図 3.7: W/Z ボソンの生成断面積。

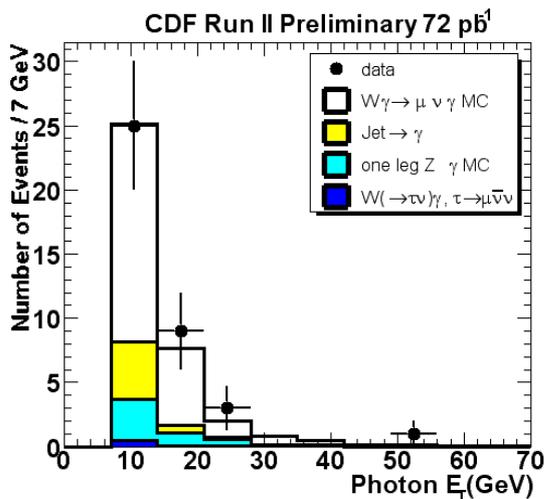


図 3.8 : W+光子事象 (μ 粒子崩壊モード) での光子の E_T 分布 . データは標準模型で期待される分布と良く一致している .

めて一致が良い . 重心系エネルギーが 1.8TeV から 1.96TeV に増強されたことにより , 予想通り生成断面積が約 9% 増加した .

W+光子の生成

W ボソンと光子の随伴生成を測定することによって $W\gamma$ がゲージ結合であることを検証する . Run I での測定 [9] に引き続き , 解析を進めている [10] . 72 pb^{-1} のデータを用いて , W の電子崩壊モード (μ 粒子崩壊モード) で 44 事象 (38 事象) の W+光子を観測した . これらは , 標準模型の予測する 48.7 ± 5.0 (36.5 ± 3.6) 事象と矛盾しない . 図 3.8 は μ 粒子崩壊モードでの光子の横エネルギー分布である . バックグラウンドを加えた標準模型で期待される分布と良く一致している .

参考文献

[1] T. Affolder et al. Measurement of the W boson mass with the Collider Detector at Fermilab, Phys. Rev. D64, 052001 (2001).
 [2] 湊浩之 (筑波大学) 博士論文 (1999), Measurement of the W Boson Transverse

Momentum Distribution in 1.8-TeV Proton-Antiproton Collisions.

[3] F. Abe et al. Measurement of Z^0 and Drell-Yan Production Cross-Section using dimuons in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.8\text{-TeV}$. Phys. Rev. D59: 052002(1999).

[4] T. Affolder et al. Measurement of $d\sigma/dy$ for High Mass Drell-Yan e^+e^- Pairs from $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.8\text{-TeV}$. Phys. Rev. D63: 011101(2001).

[5] T. Affolder et al. Direct measurement of the W boson width in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.8 \text{ TeV}$. Phys. Rev. Lett.85: 3347-3352 (2000).

[6] F. Abe et al. Measurement of the lepton charge asymmetry in W-boson decays produced in $p\bar{p}$ Collisions Phys. Rev. Lett.81: 5754 (1998).

[7] 高野秀明 (筑波大学) 博士論文 (2003), Search for W Boson Pair Production in the Lepton+Jet Channel in 1.8-TeV Proton-Antiproton Collisions.

[8] F. Abe et al. Search for Higgs bosons produced in association with a vector boson in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8 \text{ TeV}$. Phys. Rev. Lett. 81:5748 (1998).

[9] 下島真 (筑波大学) 博士論文 (1997), Measurement of the Photon Angular Distribution in the W+Photon Production in 1.8 TeV Proton-Antiproton Collisions.

[10] 谷本奈穂 (岡山大学) 他 , Cross Section Measurements for W+Photon and Z+Photon Production in Run (2003).

4. 強い相互作用の物理

エネルギー最前線の実験である CDF では、今までになく広いエネルギー領域で QCD を検証してきた。また、摂動 QCD が有効でない前方回折散乱の研究でも重要なデータを与えてきた。以下、日本グループの貢献を主として、強い相互作用の物理の研究結果をまとめる。

Run I の結果

α_s の測定

Run I のデータを用いて包含ジェット生成断面積を測定し、QCD 計算から得られる分布と比較することで、強い相互作用の結合定数 α_s をジェットの横エネルギー 40GeV から 450GeV の範囲で測定した [1]。図 4.1 に示すように、ジェット E_T とともに結合定数が "running" し、 M_Z での値は 0.1129 ± 0.0001 (統計) + $0.0078 - 0.0089$ (系統) が得られた。大きな横エネルギー領域では QCD の予想とややずれ

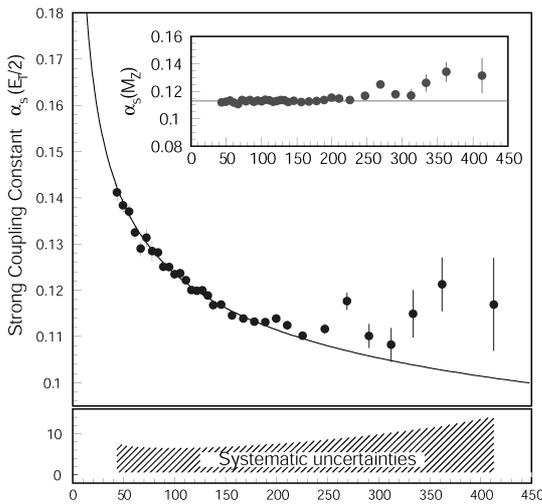


図 4.1: 強い相互作用結合定数。横軸: ジェット E_T , 曲線: 理論予想 (CTEQ4M, $\mu = E_T/2$)。

ている傾向がある。これらはすでに公表されている 2 ジェット包含生成断面積から α_s を測定した結果 [2] と良く一致している。

高い E_T でのジェット生成断面積

Run Ia のデータを用いた包含ジェット生成断面積の測定では、高い E_T 領域 (200GeV 以上) では理論予想とずれていると既に報告されていたが、Run Ib (87pb^{-1}) のデータを用いた詳細な検討結果が今回報告された [3]。結論としては、系統的なずれが見えるものの、高い E_T 領域ではパートン分布関数の不定性が大きく、グルーオン分布を多くした分布関数 CTEQ4HJ とは一致が良い。

回折散乱

ジェットが大きなラピディティ間隙を持って生成される事象は CDF によって初めて観測され、これを回折散乱における仮想粒子ポメロンの交換によるモデルで解釈してきた。超前方飛跡検出器を日本グループが主体となっ

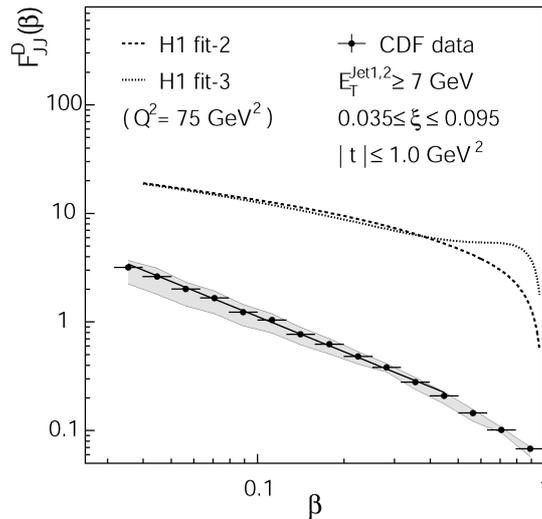


図 4.2: 2 ジェットへのポメロン構造関数。HERA からの予想分布 (破線) より CDF 結果は小さい。

て建設し, Run 1 では回折散乱研究のため詳細なデータを収集した. この研究により, 摂動 QCD が有効でない領域でのパートン分布に対する知見が得られる.

回折散乱された反陽子を超前方飛跡検出器で捕らえ, 中央部の 2 ジェットの運動学的分布を計測することで, 反陽子の回折散乱構造関数を評価した[4]. ジェットの $E_T > 7 \text{ GeV}$, 運動量移行 t に関して $|t| < 1 \text{ GeV}^2$ の領域で反陽子のパートン運動量割合 x の関数として 10^{-3} までの構造関数を測定した. また HERA H1 で測定された構造関数を用いて比較したところ, CDF 測定データは HERA 予想値よりも低く,

(パートン中のポメロン運動量の割合) 依存性も異なるため, 構造関数の因子化はできず, 絶対値や形状は HERA エネルギーとは異なることが結論された.

中央領域にボトムクォークの発生を伴う回折事象を測定した[5]. W やジェットの回折発生割合と比較することで, ポメロンが主にグルーオンなのかクォークなのかの知見を得ることができる. 図 4.3 はグルーオン割合 fg が

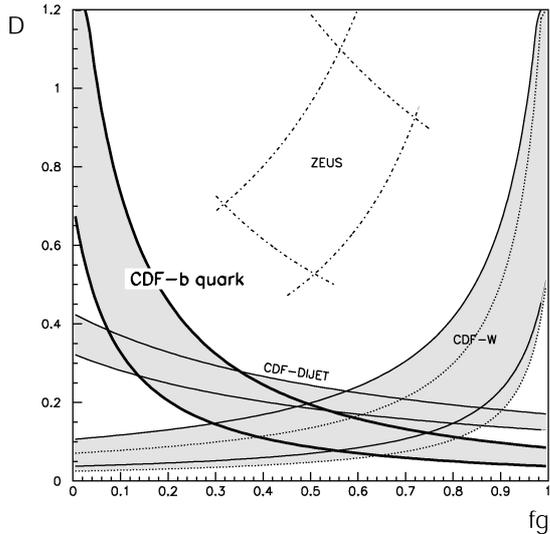


図 4.3: ポメロン構造のグルーオン割合と理論フラックスとの比.

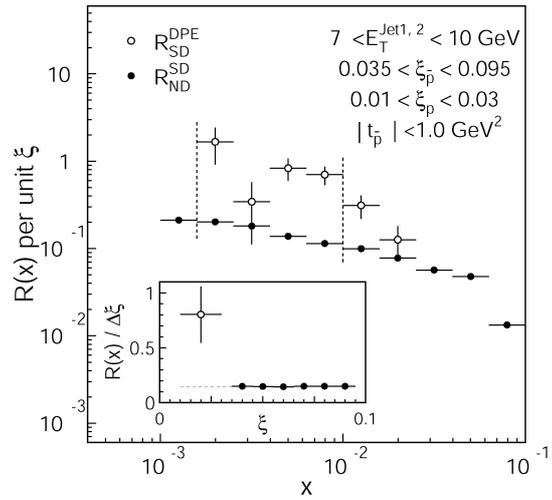


図 4.4: 2 重ポメロン散乱と単ポメロン散乱の比 (白丸) および単ポメロン散乱と非回折散乱の比 (黒丸). 横軸は陽子もしくは反陽子運動量に対するパートンの運動量割合. 囲みの横軸は運動量減少の割合.

~ 0.5 の場合にすべての CDF 結果が説明できることを表すが, 理論予想値の ~ 0.2 倍しか発生量がないことを示す. 構造関数の因子化ができないことの証拠である.

超前方飛跡検出器で反陽子の回折散乱を, 前方カロリメータのラピディティ間隙で陽子の回折散乱を同定することで 2 重ポメロン交換によるジェット生成事象を初めて検出した[6]. 構造関数が因子化できれば, 2 重ポメロン交換と単ポメロン交換との比は, 単ポメロン交換と非回折散乱の比と一致するはずであるが, 図 4.4 に示すように両者は一致しないことが判明した.

Run a の結果

包含ジェット生成断面積

包含ジェットの生成断面積の測定は積分ルミノシティ 85 pb^{-1} のデータを解析して, 図

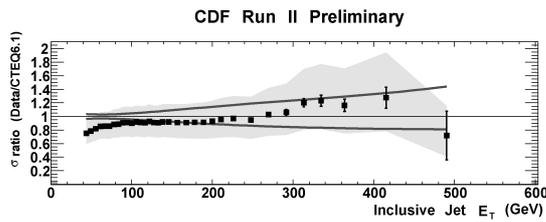


図 4.5： 包含ジェット生成断面積の理論予想とのずれ。曲線は分布関数の不定性，影の部分はジェットエネルギーの不定性の領域を示す。

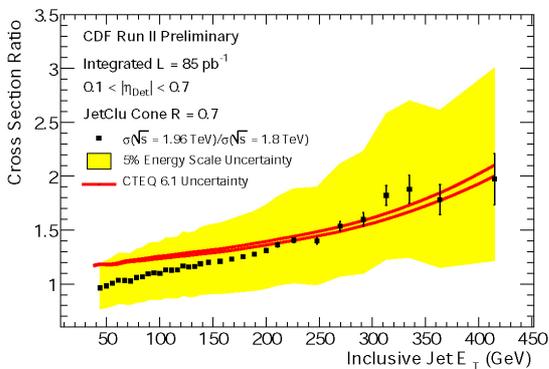


図 4.6： 包含ジェット生成断面積の Run I と Run II との比。

4.5 の結果を得ている。図は理論曲線とのずれを示し、系統的なずれがあるが、分布関数 (CTEQ6.1) やジェットエネルギー・スケールの不定性の範囲内で両者は一致する。

図 4.6 は包含ジェット生成断面積を Run I と Run II で比をとったものである。重心系エネルギーが増えたため比は 1 を超えるが、増加の程度は理論予想と良く一致している。

参考文献

- [1] T. Affolder et al. Measurement of the strong coupling constant from inclusive jet production at the Tevatron $p\bar{p}$ Collider. Phys.Rev. Lett.88: 042001 (2002)
- [2] 岡部正和 (筑波大学) 博士論文(1998)

Measurement of the Strong Coupling Constant from Two Jet Production Cross Section in 1.8-TeV Proton-Antiproton Collisions.

- [3] T. Affolder et al. Measurement of the inclusive jet cross section in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV. Phys. Rev. D64: 032001 (2001), Erratum-ibid.D65: 039903 (2002)

- [4] 中田方斎 (筑波大学) 博士論文 2001, Measurement of the Diffractive Structure Function of the Antiproton in 1.8-TeV Proton-Antiproton Collisions.

T. Affolder et al. Phys. Rev. Lett. 84: 5043 (2000).

- [5] 池田拓史 (筑波大学) 博士論文 1999 Observation of Diffractive Bottom Quark Production in 1.8-TeV Proton-Antiproton Collisions

- [6] 寺師弘二 (筑波大学) 博士論文 2000 Observation of Dijet Production by Double Pomeron Exchange in 1.8-TeV Proton-Antiproton Collisions.

T. Affolder et al. Phys. Rev. Lett. 85: 4215 (2000)

5. 標準理論を超える物理

現在標準理論は実験データと高精度で一致しているが、現在より高いエネルギー領域では新しい理論が必要になる可能性がある。エネルギー・フロンティアでの実験である CDF では、数多くの未知の粒子を探索してきた。以下では、日本グループの貢献を中心に述べる。

Run 1の結果

テクニカラー粒子の探索

標準理論では、ヒッグス機構による電弱対称性の自発的破れにより粒子の質量が説明されるが、いまだにその証拠となるべきヒッグス粒子は発見されていない。一方、テクニカラー理論では、新しいテクニカラー力を導入し、ヒッグス粒子を2つのテクニクォークの束縛状態に置き換えることで電弱対称性の破れを説明する。この理論では、陽子・反陽子衝突によりカラー三重項のテクニロー粒子 (r_T) が生成されると考えられる。このテクニロー粒子を、まず W 粒子とテクニパイ粒子 (p_T) に崩壊し、さらにテクニパイ粒子が b クォーク対に崩壊するモード ($r_T \rightarrow W p_T \rightarrow W b \bar{b}$) で探索した。この探索のため、 $W \rightarrow l n$ または $W \rightarrow q \bar{q}$ を伴った $b \bar{b}$ 事象を選別した。その事象数は、標準理論でバックグラウンドとして期待される事象数と一致した。このことから、テクニパイ粒子とテクニロー粒子の質量に対し、図 5.1 に示すような排除領域を求めた[1][2]。

超対称性粒子の探索

超対称性理論の多くのモデルでは、三世代

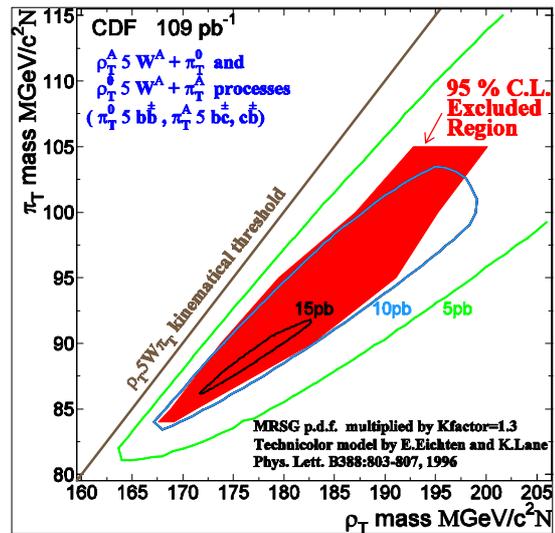


図 5.1: 95%信頼度で排除されたテクニパイ粒子とテクニロー粒子の質量領域 (影部) と 95%信頼度の生成断面積 (実線)。

目の超対称性粒子であるストップ粒子は比較的質量が軽いと予想されている。このストップ粒子を、 R パリティを破る超対称性理論の枠組みを仮定して探索した。ストップ粒子は、テバトロンにおいて対生成すると考えられるが、 R パリティを破るモデルでは、ストップ粒子はタウ粒子 (τ) と b クォークに崩壊可

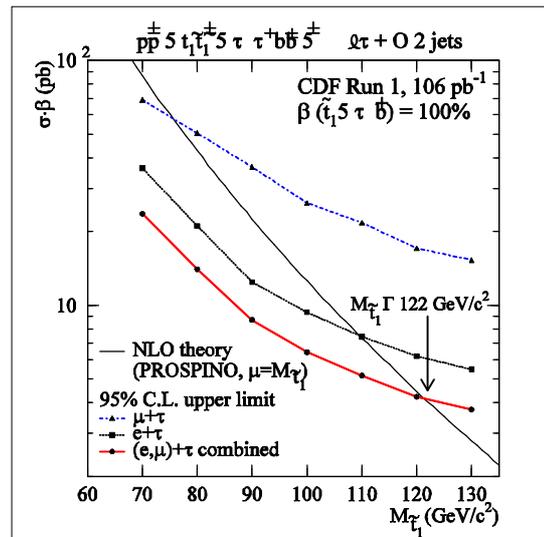


図 5.2: ストップ粒子対生成断面積の上限値と理論計算値との比較。

能となる．一方のタウ粒子が電子またはミューオンへ崩壊し，もう一方がハドロンへ崩壊するモードにおいて探索を行った．事象選別した結果，ストップ粒子対の候補事象はなかった，その結果，図 5.2 に示す生成断面積の上限を得た．また，ストップ粒子が常にタウ粒子とbクォークに崩壊するとして，ストップ粒子の質量下限値 $122 \text{ GeV}/c^2$ (95%信頼度) を得た[3]．

Run a の結果

Z' ボソンの探索

標準理論を拡張したモデルのうち，新たなU(1)群を含むモデルでは Z' ボソンが存在する．我々は，Z' $l^+ l^-$ ($l = e$ or μ) の崩壊過程で探索を行った．データは，標準理論からの予想とよく一致した(図 5.3)．これより，結合定数が標準理論と同じだと仮定することで Z' の質量下限値 $665 \text{ GeV}/c^2$ を得た．

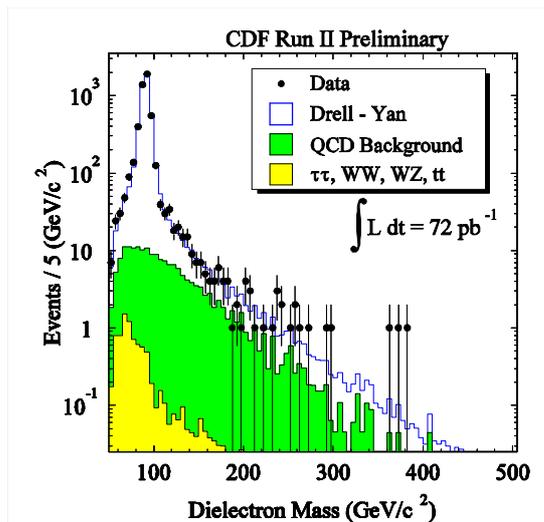


図 5.3: 電子・陽電子対に崩壊するモードでの不変質量分布．ヒストグラムは標準理論から期待される分布．

ランドール・サンドラム重力子の探索

近年発展してきた余剰次元の理論のうち，ランドールとサンドラムのモデルにより予言される重力子の質量は TeV スケール程度の可能性がある．これについても，レプトン (e または μ) への崩壊過程により探索を行うことにより，図 5.4 に示すパラメーター領域を排除した．

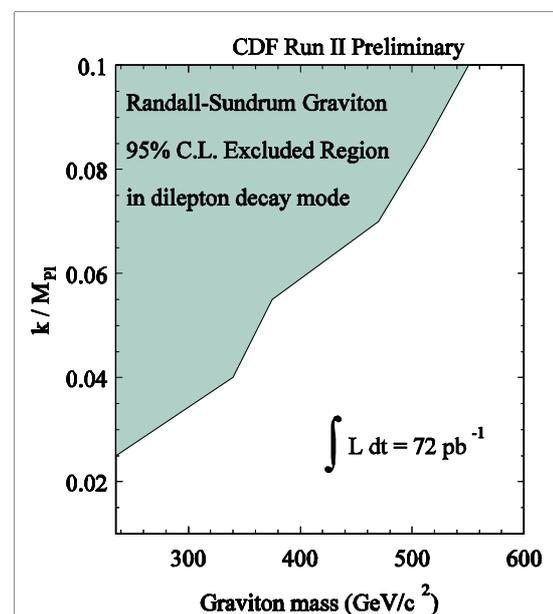


図 5.4: k / M_{pl} (無次元の結合定数に相当するもの) と重力子質量の平面での排除領域 (95%信頼度)．

参考文献

- [1] 半田隆信 (広島大学) 博士論文 (1999) , Search for Technicolor Particles in 1.8-TeV Proton-Antiproton Collisions .
- [2] Search for Color Singlet Technicolor Particles in $p \bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.8\text{TeV}$, T. Affolder et al., Phys. Rev. Lett. 84 (2000) 1110-1115.
- [3] 宮崎由之(大阪市立大学)博士論文(2002) ,

Search for Scalar Top Quark
Pair-Production by R-Parity Violating
Decay Mode in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} =$
1.8TeV .

【6】検出器増強

2001年から始まった衝突実験 Run a では、加速器の大幅な増強により、目標ビーム強度が10倍に、またビーム衝突間隔が396 nsまで短縮された。これに伴いCDF検出器各部の改造・増強が行われ、CDF検出器が完成した(図1)。CDF日本グループは、CDF検出器に設置されるプラグ電磁カロリメーター、プラグプリシャワー検出器、シリコン・バーテックス検出器(SVX)、中間部シリコン飛跡検出器(ISL)、TOFカウンター、データ収集システムの開発製作を担当した。プラグ電磁カロリメーター、プリシャワー検出器の開発製作は筑波大、早稲田大、KEKが、シリコン・バーテックス検出器の開発製作は広島大、岡山大、京都教育大が、中間部シリコン飛跡検出器の開発製作は筑波大、大阪市立大、近畿大が、TOFカウンターの開発製作は筑波大が、またデータ収集システムの開発製作はKEK、早稲田大、筑波大、長崎総合科学大がそれぞれ担当した。

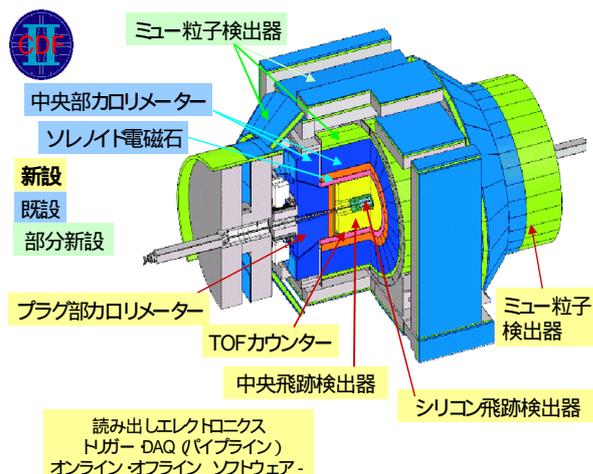


図 1: CDF 検出器。

1. プラグ電磁カロリメーターおよびプリシャワー検出器

ビームの衝突間隔が大幅に短縮される Run a では、従来のプラグ部ガスカロリメーターでは応答が遅すぎるため、シンチレーター板に波長変換ファイバーを埋め込んだタイル/ファイバー型カロリメーターに置き換えられた。プラグカロリメーターは、衝突点に近い方からプリシャワー検出器、電磁カロリメーター、ハドロンカロリメーターの各検出器から成り、また電磁カロリメーター内部にはシャワーマックス検出器が設置される。電磁カロリメーターは、タイル/ファイバーを用いたサンプリング部と吸収体である鉛板を交互に23層重ねた構造をしている。衝突点に最も近い第一層目は、特に光子の同定能力を向上させるためにプリシャワー検出器として用いられ、他のサンプリング層とは独立な信号読み出し経路を持っている。タイル/ファイバー検出器は方位角で15°ずつに分割されており、これを一つのユニットとしている。各ユニットは20枚のタイルから構成されている。カロリメーターおよびプリシャワー検出器のタイル/ファイバー・ユニットの開発研究 [1] [2] [3] [4] [5]、大量生産[6]は筑波大を中心にして行われ、全てのユニットの宇宙線テストは1996年までに筑波大で完了した [7]。

カロリメーターの性能を評価するために、1996年末より1997年秋までテストモジュールを用いたビームテストをフェルミ研究所で行った。ビームテストはKEK、筑波大、早稲田大グループがフェルミ研、ロックフェラー大、ロチェスター大などと協力して行った。このビームテストの結果、カロリメーターの

エネルギー分解能(14.5% $E^{-1/2} \oplus 0.7%$), 線形応答性(10GeV-400GeV で 1%以下の非線形性) について所定の性能が得られることが確認された [8] [9] [10].

ビームテスト終了後, プラグ電磁カロリメーターの組立を完了し, ゲインの調整とエネルギー較正に用いる基礎データを得るため, 宇宙線 μ 粒子に対する応答を測定した. これらの組立・テストは, 筑波大, 早稲田大グループがフェルミ研, ロックフェラー大, ウィスコンシン大などと協力して行った.

すべてのテストが終了したプラグカロリメーターのCDF 検出器への設置は, 1999年に完了した. 2001年春に開始した Run a では期待どおりの性能を示していることが, 陽子反陽子衝突実験データの解析結果により確認された. 図 1.1 は $Z \rightarrow e^+e^-$ 崩壊で生成した電子(陽電子)の一方がプラグ電磁カロリメーターで検出された Z ボソンの不変質量分布の測定結果がモンテカルロ・シミュレーションと一致することを示している. このことからプラグ電磁カロリメーターが所期の性能を有していることが確認された.

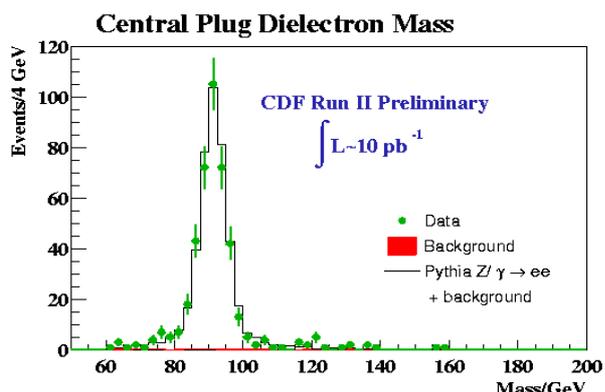


図 1.1: $Z \rightarrow e^+e^-$ 不変質量分布. 電子(陽電子)の一方がプラグ電磁カロリメーターで検出された Z ボソン. ヒストグラムはモンテカルロ・シミュレーションを表す.

参考論文/講演

- [1] S. Aota et al., "A Scintillating tile/fiber system for the CDF plug upgrade EM calorimeter", Nucl. Inst. and Meth. A352 (1995) 557-568.
- [2] Y. Seiya, "CDF calorimeter and its upgrade", 1994 Beijing Calorimetry Symposium", Beijing, China (1994).
- [3] S. Kim, "R&D and mass production of a scintillating tile/fiber system for the CDF plug upgrade EM calorimeter", The 6th Pisa Meeting on the Advanced Detector, Pisa, Italy (1994).
- [4] S. Aota et al., "Development of fiber-to-fiber connectors for scintillating tile/fiber calorimeters", Nucl. Inst. And Meth. A357 (1995) 71-77.
- [5] K. Hara et al., "Radiation hardness and mechanical durability of Kuraray optical fibers", Nucl. Inst. And Meth. A411 (1998) 31-40.
- [6] S. Aota et al., "Mass Production of Tile/Fiber Units for the CDF Plug Upgrade Calorimeter", Nucl. Inst. And Meth. A420 (1999) 48-61.
- [7] T. Asakawa et al., "Cosmic-ray tests for the quality control of the CDF plug upgrade EM calorimeter and the CDF plug preshower detector", Nucl. Inst. and Meth. A452 (2000) 67-80.
- [8] M. Albrow et al., "A preshower detector for the CDF plug upgrade: Test beam results", Nucl. Inst. and Meth. A431 (1999) 104-111.
- [9] M. Albrow et al., "CDF plug EM calorimeter: Test beam results", Nucl.

Inst. and Meth. A480 (2002) 524-546.

[10] M. Albrow et al., " Intercalibration of the longitudinal segments of a calorimeter system", Nucl. Inst. and Meth. A487 (2002) 381-395.

2 . SVX シリコン・バーテックス 検出器

Silicon Vertex Detector (SVX) の概観を図 2.1 に示す .SVX は同等の三つのパレルから成り、各々のパレルは 5 層のセンサー部と最外層のポートカードにより構成され、センサーの各層は、12 個の両面読出しのシリコン検出器ラダーを筒状に配置した構造になっている .SVX は、その内側に位置する片面シリコン検出器の層 L00 と SVX の外側に位置する両面シリコン検出器の層 ISL を合わせて独立した高精度飛跡検出器を構成している .SVX の情報によりトリガー段階及びオフラインでの二次崩壊点検出が可能となり、特にボトム・チャームの物理あるいは、トップクォークの物理において極めて重要な役割を果たす .

シリコン検出器ラダーは、四枚の両面読出しのシリコン・マイクロストリップ・センサーを一列に並べ、両端のセンサー上に読み出しエレクトロニクスを備えた構造になっている .ラダーの数は、SVX 全体で 180 個あり、

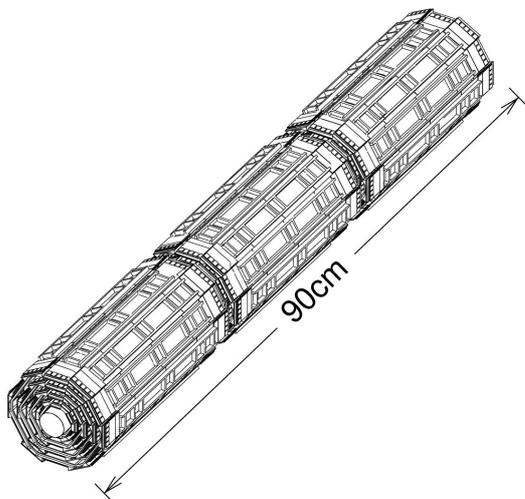


図 2.1: SVX 検出器の模式図 .

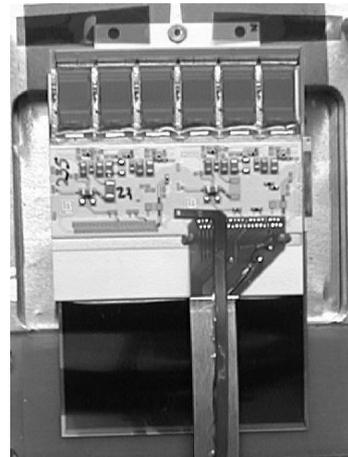


図 2.2: 組み立てられた第四層のラダーのひとつ .これが各層ごとに 24(+予備)個製作される .

シリコンセンサーは合計で 720 枚になる .読み出しエレクトロニクスには放射線耐性に優れた SVX3D チップが使用され、アナログ・パイプラインにより不感時間無しでの 53MHz 駆動が可能である .ポートカードは読み出しエレクトロニクスとデータ収集系とを結ぶ中継機能を持っており、データとコントロール信号をやり取りする .また、このポートカードで電氣的信号を光信号に変換している .

SVX の建設には、広島大、岡山大、京都教育大を中心とした日本グループが、R&D の段階から中心的かつ本質的な役割を果たした .放射線耐性に優れた両面読出しのシリコン・マイクロストリップ・センサーを開発し[1]、その製造技術を確立した[2,3] .また、ハイブリッド・フロントエンド・エレクトロニクスの開発にも貢献した[4] .このように SVX 検出器の開発・仕様の確定は 1997 年度までに完了し、1998 年度以降は、第一層、二層および第四層のセンサーの供給、第四層のラダーの組み立て、およびその動作テストを日本グループが担当した .図 2.2 の写真は、浜松ホトニクスで組み立てた第四層のラダーのひとつ

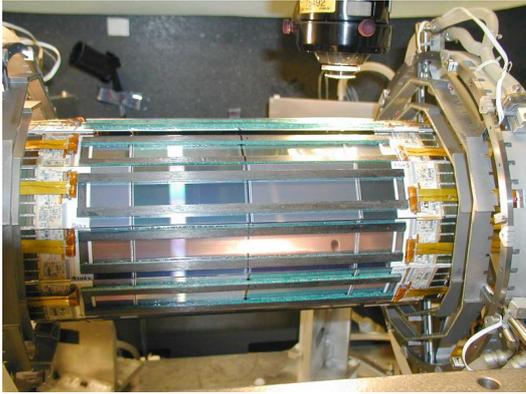


図 2.3: シリコン検出器ラダーをバレルのフレームに組み込んでいる様子。

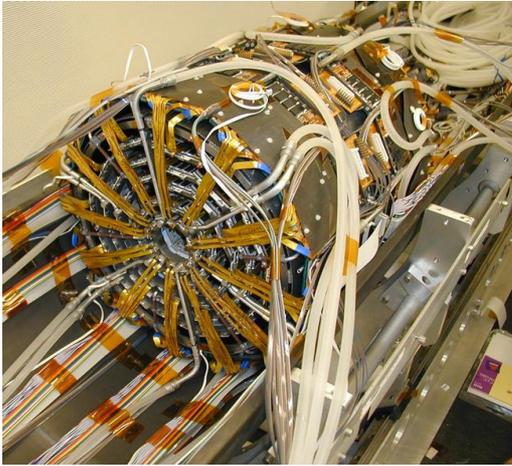


図 2.4: 組み立てられた SVX のバレルのひとつ。最外層表面に見えているのはポートカード。側面に各センサーの層から読出しのためのケーブルがポートカードに接続されているのが見える。白い管は冷却水のチューブ。

である。図のものは、本来 4 枚あるセンサーのうち 1 枚のみがフロントエンドに接続されたもので 1/4 ラダーと呼ばれる。

2000 年度に SVX の製作は完了し(図 2.3, 図 2.4), 2001 年度に前述の L00 および ISL と組み合わされて, CDF の検出器本体へ設置された[7] 2001 年 7 月に SVX の設置が完了し, 調整をして運転に入った。

2001 年度は, 主にポートカードのデータ中

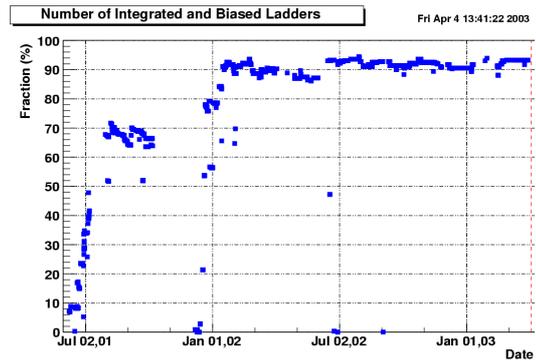


図 2.5: SVX のラダーの稼働率。横軸は, Run a の開始から 2002 年度末まで。

継部の問題でコミッショニングに時間を大きく費やされたが, 徐々に稼働率を上げていって, 2002 年度は安定して 90%以上が動いている。図 2.5 は, SVX 検出器ラダーの稼働率の時間推移を表している。

SVX の運転では, 日本グループはオフライン・モニターを担当した。オフライン・モニターは, シリコン検出器の較正や稼働状況を記録したデータベースの視覚化や, 収録したデータをモニター用プログラムで処理することによって, シリコン検出器の基本的パラメータを点検し, 正常運転していることを常時監視する。オフラインモニターには前述の各大学に加え, 筑波大, 大阪市立大が分担している。

参考文献

- [1] Y. Iwata et al., Nucl. Instr. And Meth. A489, 114 (2002).
- [2] Y. Iwata et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. 45, 303 (1998).
- [3] T. Ohsugi et al., Nucl. Instr. and Meth. A436, 272 (1999).
- [4] Y. Iwata et al., Nucl. Instr. And Meth. A466, 390 (2001).

3. 中間部シリコン検出器 (ISL)

ISL (Intermediate Silicon Layers) 検出器は中央部 1 層, 前後方部 2 層の両面シリコンマイクロストリップ検出器からなる。中央飛跡検出器 (COT) とヒット密度の多い SVX シリコン検出器の中間位置で基準ヒット点を与えることで, COT - SVX 飛跡再構成の高速化を図る。また, COT が荷電粒子を充分補足できない前後方部では SVX と ISL のみで独自に運動量測定を行う。これにより b ジェットを同定できる領域を増やすことができる。

日本グループは約半数のシリコンセンサーの設計・製造・検査を担当した[1]。センサーは浜松ホトニクスで製造し, サンプルング試験を筑波大学で行った[2]。図 3.1 は不良チャンネル数の分布を示す。フェルミ研究所でセンサーはラダ - 状に組み立てられ, さらにパレル状に組み上げられた[3]。図 3.2 は CDF 検出器に設置する直前の全体写真である。熱および電気シールドを施して CDF に組み込まれた。

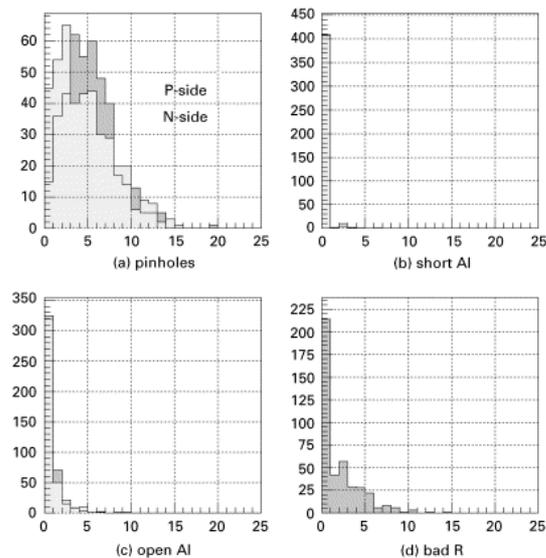


図 3.1: センサー (片面 512ch) 当たりの不良チャンネル数の分布。不良原因は 4 つに分類。

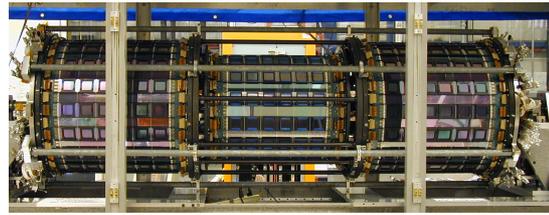


図 3.2: ISL の全体: 半径約 30 cm, 長さ約 1.8m.

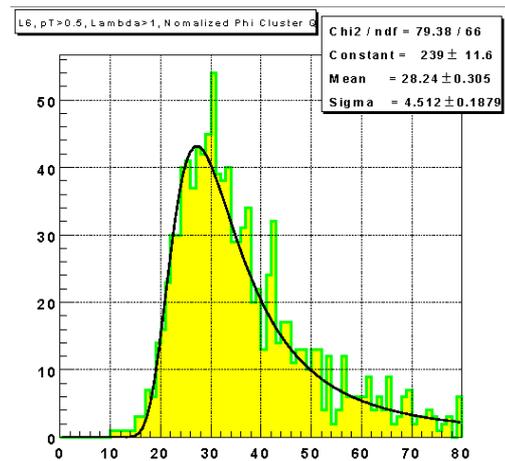


図 3.3: ISL の収集電荷分布。

2001 年 3 月から始まった Run a では冷却系統の問題 (接着剤が配管をつまらせた) のため約 35% が暫く稼動できない状況であったが, 詰まりを YAG レーザーで焼き切る修理を施すことで 現在では 90% が稼動状態にある。

日本グループはデータ収集中の SVX を含めたシリコン検出器のモニターを分担している。図 3.3 は ISL の電荷分布である。垂直に入射する飛跡に対して S/N 約 12 を達成している。

参考文献

- [1] K. Hara et al., Prototype Si Microstrip Sensors for the CDF- ISL Detector, Nucl. Instrum. and Methods A435, 437 (1999).
- [2] A. Affolder et al., Intermediate silicon layers detector for the CDF

experiment, Nucl. Instrum. and Methods
A453, 84 (2000).

[3] A. Affolder et al., The Intermediate
Silicon Layers Detector at CDF : Design
and Progress, Nucl. Instrum. and Methods
A435, 44 (1999).

4. TOFカウンター

CDF Run 検出器では、ソレノイド電磁石の内側の領域を占める飛跡検出器は全て新たな検出器で置きかえられた。その一番外側、ビーム軸からの距離 1.4 m に位置するのが粒子識別を目的とする粒子飛行時間 (TOF) 検出器である (図 4.1)。

長さ 2.8 m、断面 4 cm x 4 cm のプラスチック・シンチレータ 216 本を樽状に配置し、荷電粒子の通過により生じた光をシンチレータの両端で光電子増倍管により電気信号に変

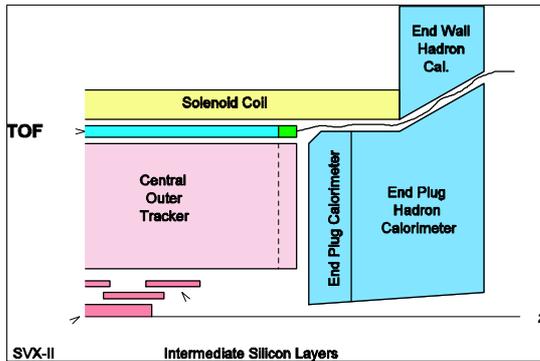


図 4.1: CDF 検出器の中央部の断面図。TOF カウンターの位置を示す。

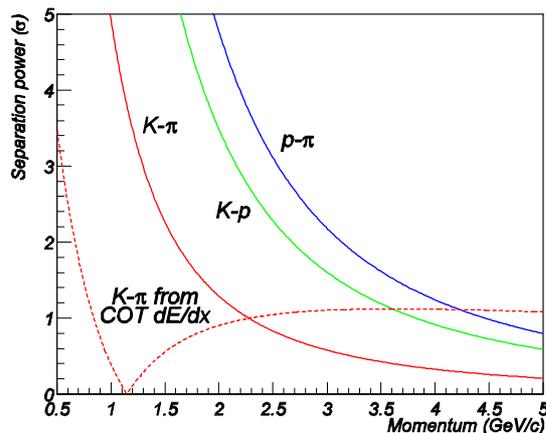


図 4.2: TOF カウンターによる K/π 分離能力の運動量依存性。

換して、粒子が到着するまでに要した時間を測定する。中央部飛跡検出器では粒子の運動量が測定され、これらふたつの情報から粒子の質量を決定することにより、粒子識別を行う。目標とする時間分解能は 100 ps であり、1.6 GeV/c 以下の運動量領域で 2 標準偏差以上の K/π 分離が可能となる (図 4.2)。

本検出器は高い時間分解能を得るために、シンチレータの直近に光電子増倍管を配する設計となっている。検出器全体がソレノイド中に存在するため、光電子増倍管もその管軸方向に 1.4 T の強磁場を受けることとなる。通常の光電子増倍管は数 mT 程度の磁場でもその増幅度などに影響を受ける。本検出器では、強磁場中でも動作可能なファイン・メッシュ型ダイノードを持つ光電子増倍管を用いることにより、この問題を回避している。光電子増倍管 R7761 は浜松ホトニクス社により開発された。直径 38 mm、長さ 50 mm、19 段のダイノードを持ち、1.4 T の磁場中でも 10^5 以上の増幅率を維持することが可能である (図 4.3)。

予備を含め 450 本以上の光電子増倍管が製作され、そのほぼ全数に対して高エネルギー加速器研究機構の牛若電磁石を用いて磁場中での動作測定を行い、較正データを取得し、

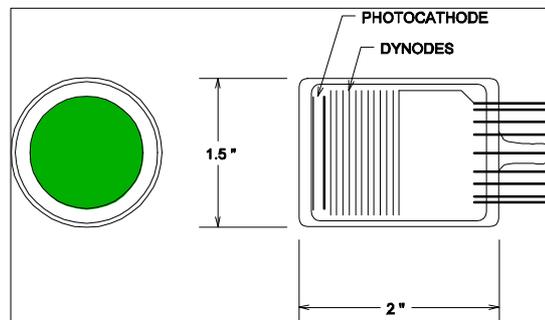


図 4.3: ファイン・メッシュ型光電子増倍管 R7761 の模式図。

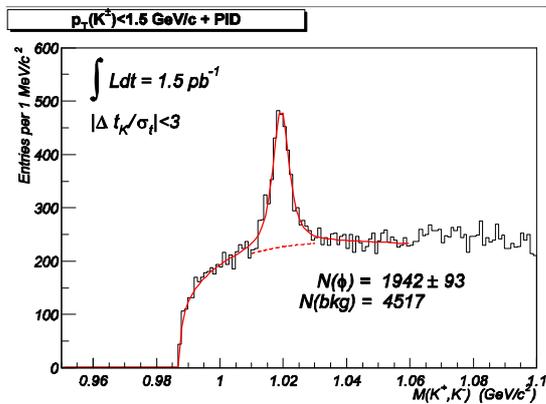
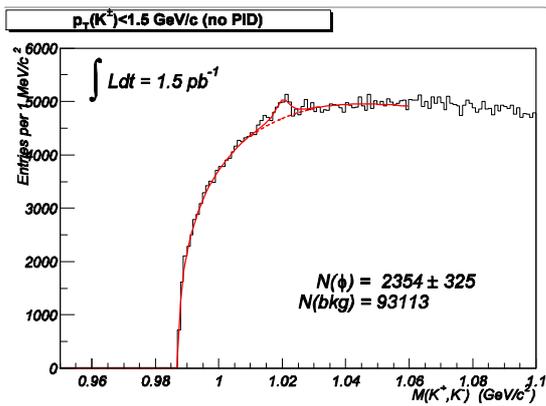


図 4.4 : TOF による粒子識別を施す前(上)と施した後(下)での $\phi \rightarrow K^+K^-$ 候補事象の質量分布. 信号に対する効率 82%に対し,バックグラウンドが 1/20 に減少している.

また要求される性能を持っていることを確認した. その後フェルミ研究所に送られ, 1999 年から CDF 検出器への設置を開始し, 2000 年 5 月に完了した. 2001 年夏には読み出しエレクトロニクスが完成し, 衝突事象を用いて, 光電子増倍管の増幅率のチャンネル間の均一化などの較正を行った. これまでに時間分解能 110 ps が達成されており, B 粒子崩壊の再構成, フレーバー同定など, 物理解析での利用が可能な段階に達している(図 4.4).

5 . データ収集システム

Run a での加速器の増強および CDF 測定器の改良に合わせて、データ収集システムも高速かつ多機能なものを開発した。

筑波大と長崎総合科学大は、最終段のレベル3 トリガーで選別された事象データを受け取り、すべてのデータを磁気ディスクに書き込むとともに、要求に応じてモニター・システムにデータを分配するためのシステム、コンシューマー・サーバー/ロガー(以下 CS/L)の構築をロチェスター大とともに担当した [1] .

レベル3 トリガーを構成する PC ファームで選別された事象は、複数の Fast Ethernet を通じて SGI の UNIX server 上で動いている CS/L へ送られる。このときの転送速度は最大 75Hz , 20MB/sec である。CS/L は、一部の事象をネットワークを通じてコンシューマーと呼ばれるモニター用プロセスに配送し、またすべての事象データを Fiber Channel で接続された RAID ディスクに書き込む。この RAID ディスクは、もう一台の SGI の server にも接続されており、これによりデータが読み出され、磁気テープに記録される(図 5.1)。

CS/L は Run a の実験開始前より安定して動作しており、期待どおりの性能を示していることも確認された。

早稲田大学は、オンライン・モニターであるコンシューマーのソフトウェア・フレームワークを担当した [2] .Java と C++ を用いて作成されたプログラムは、多機能であるが問題なく動作している。また、KEK は、コンシューマーの一つでもあるイベント・ディスプレイ開発に携わった。

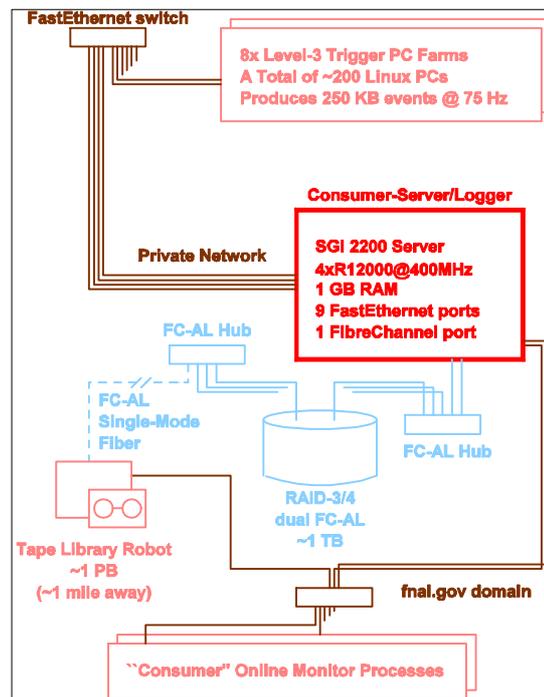


図 5.1: コンシューマー・サーバー/ロガーのハードウェア構成

参考文献

- [1] M. Shimojima et al., "Consumer-Server/Logger System for the CDF Experiment", Proc. Of the 11th IEEE NPSS Real Time Conference (Santa Fe, New Mexico, USA, June 1999).
- [2] T. Arisawa et al., "CDF Run Run Control and Online Monitor", Proc. Of Int. Conference on Computing in High Energy and Nuclear Physics (Beijing, China, September 2001).

6 .Run b用シリコン検出器(SVX b)

現行のSVX シリコン検出器は, Run b 期間中に放射線損傷の為に十分な性能が発揮できなくなると評価されている. 下表はシリコン各層の衝突点からの距離と寿命に対応するルミノシティーを示している. 全空乏化電圧上昇に伴う酸化層の耐圧の問題やアンプノイズ上昇の問題, 光信号システム DOIM の寿命も問題である.

現行シリコン検出器
の位置と寿命となる
ルミノシティー.

CDF	R_{min} (cm)	L (fb^{-1})
L00	1.35	7.4
L0	2.54	4.3
L1	4.12	8.5
L2	6.52	10.7
ISL	20 - 28	>40
DOIMs	14	5.7

DOIM のみや内部層のみの交換は困難であるため, ISL だけを残して, 他をすべて更新する事とした. 2000 年より放射線耐性に優れたSVX b 用シリコン検出器の設計を開始した. 開発研究を経た後, 計画は2002年に承認され, 現在は量産体制に移行中である.

SVX bは図6.1に示す様に, ほとんどの部分がステイブとよぶモジュールからなる構造をしている. ステイブは冷却パイプを挟んで片面センサー2組からなる構造(図6.2)で, 衝突点を5層で取囲む. 最内層(L0)のみ, 片面センサー1組からなる現行のL00と似た構造である. ステイブには必要最小限の読み出しエレクトロニクスを載せることで, 効率的な直接冷却を実現した上で現行のシステムより物質量を抑えた. この様なモジュール化を計ることで大量生産に適應でき, 建設期間を短くすることができる. ステイブからはデジ

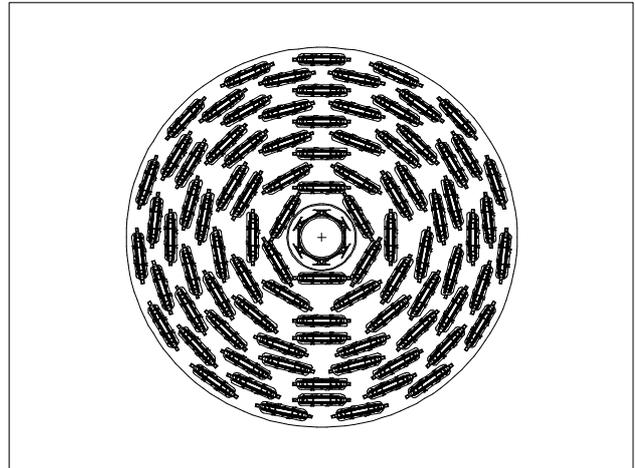


図 6.1 : Run b用シリコン検出器のビーム軸回りの構造. 各長方形がステイブを表す. ビームパイプの部分のみ現行のL00の構造.

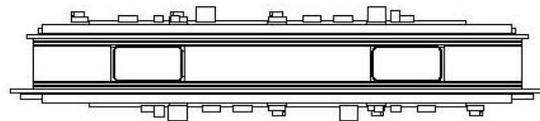


図 6.2 : ステイブの構造. 中心部は2本の冷却パイプとフォーム. 上下にシリコンセンサーを接着し, その上に読み出し用ハイブリッド基板を載せる.

タル化された信号が取り出される. L0のみシリコンからの信号を直接微細ケーブルで取り出し, トラッキング領域外部でデジタル化する. こうすることで, 物質量をさらに減らし, 読み出しエレクトロニクスの放射線量を減らすとともにスペースの問題を解決する.

日本グループはシリコンセンサー全ての製造, 半数の検査を受け持ち, また, L0用微細信号ケーブルの製造・検査を分担する.

シリコン検出器は放射線とともに物性が変化し, 型変換した後は全空乏化電圧が上昇する. そのため, 両面シリコンセンサーでは酸

化膜の耐圧限界（SVX の浜松製は約 100V，マイクロン製は約 50V）を越えてしまう．放射線耐性を高くするには，片面センサーにし，積極的な冷却で暗電流の増加に伴うノイズの増加を抑える事が重要である．さらにセンサー自体も，高電圧まで動作可能であることが必要となる．

2002年に浜松ホトニクスでプロトタイプセンサーを製作し，筑波大学グループが電気性能，機械性能を測定した[1]．図6.3は試作した60枚のセンサーの電圧-暗電流特性である．いずれも500Vで2 μ A以下の要求を満たしている．特に殆どは1000Vまで暗電流が殆ど増加せず，優れた性能を示している．

この他の電気特性についても詳細に測定した結果，いずれの項目も要求を満たし，優れた特性を示した．特に使用不能チャンネルの割合は0.003%未満で我々の要求1%を大きく下回る結果であった．

センサーは30fb⁻¹で最大1cm²あたり1.4 \times 10¹⁴の中性子を浴びる．UC デービスでこの線量の中性子照射を行い，筑波大学，パーデュー大学，ニューメキシコ大学で照射後の性能を評価した[2]．全空乏化電圧の変化や暗電流の増加は予想通りの結果が得られた．ストリップ間容量や抵抗についても，バイアス電圧を全空乏化電圧より高めに設定することで，

要求する性能を満たすことが分かった．

L0に用いる微細信号ケーブルは，岡山大学グループが中心となって開発研究を行っている．エッチングにより50ミクロンピッチで信号線を形成する技術は，我々が要求する60cmの長さのものについては確立されていない．現在，信号線の幅の最適化，破断の修復方法などを含めた開発研究を行っている．

Run 2bシリコン検出器は2005年夏の完成を目指して，現在，最終試作機の評価を経て，一部の量産を開始している．

参考文献

- [1] K. Hara and Y. Takei, CDF note 6286 “Characteristics of prototype silicon sensors for Run2b (I)”, (2002)
- [2] N. Bacchetta et al., CDF note 6287 “Characteristics of prototype silicon sensors for Run2b ()”, (2002)

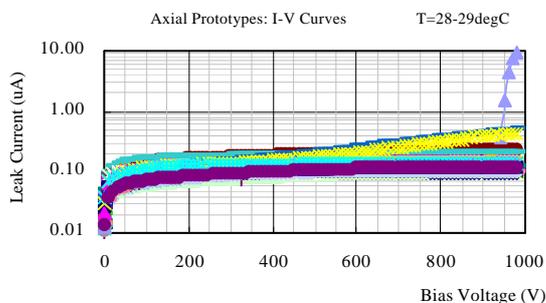


図6.3： 試作したセンサーのI-V特性．

7 .Run b用中央部プリシャワー検出器 (CPR2)

CPR 検出器は ,中央部電磁カロリメータ CEM のプリシャワー検出器として 1988-89 年の Run0 実験の終了後に製作・設置されて Run 実験以来稼働している . その主たる役割は光子・電子の同定である . CPR はガス比例計数管を用いた検出器であり , その特性上 , 信号を収集するのに $1 \mu\text{s}$ 程度の時間を要する . Run

実験までは , テバトロン加速器は陽子と反陽子のバンチ数がそれぞれ 6 で運転され , ビーム交差間隔は $3.6 \mu\text{s}$ であった . Run 実験よりバンチ数は 36 となり , 最小ビーム交差間隔は 400 ns となっている . したがって , CPR 検出器には複数のビーム交差で生じた粒子による信号が重なる可能性がある . これはテバトロン加速器の瞬間輝度がさらに上昇する Run b 実験では深刻な問題となる . これを解決するためには , 早い時間応答性とより細かい空間分割を持った検出器にする必要がある .

このための開発研究が 2001 年度より開始

1	Aluminum
1	Aluminum
1	25mm x 20mm scintillator
1	silicon
1	Aluminum
1	optical connector

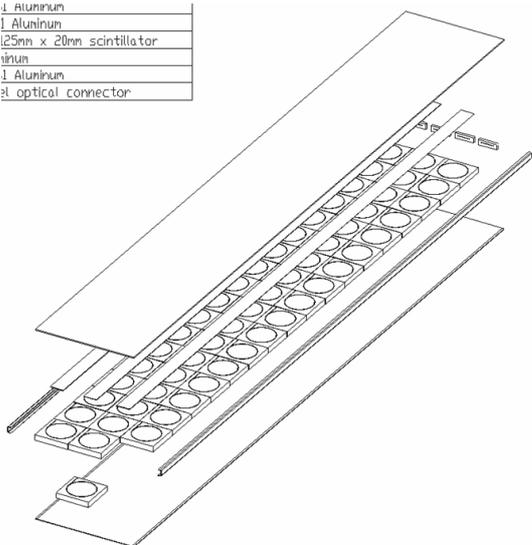


図 7.1 : CPR2 検出器の模式図 .

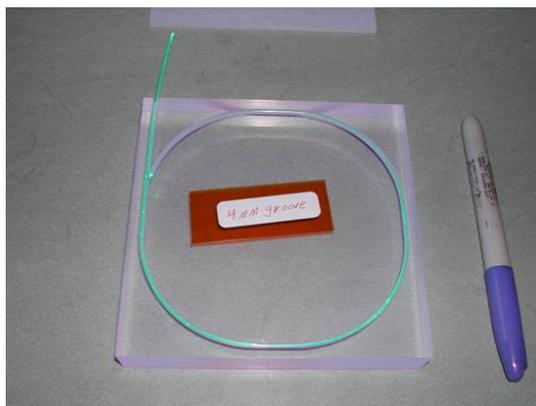


図 7.2 : CPR2 のシンチレータ・タイルと波長変換ファイバー .



図 7.3 : CPR2 検出器の試作機 . 端部での透明ファイバーへの変換コネクタが見える .

され , CPR 検出器をプラスチック・シンチレータを用いた光検出器 CPR2 で置き換える計画が進められている . 現在の設計の模式図を図 7.1 に示す . CPR2 の最小の構成要素は 12 cm 角 , 厚さ 2 cm のシンチレータ・タイルである (図 7.2) . 荷電粒子の通過により発生した青色光は , タイルの溝に埋め込まれた波長変換ファイバー (Y11) に吸収され緑色光に変換される . 波長変換ファイバーは検出器の端でコネクタを通して透明ファイバーに連結され (図 7.3) , 光電子増倍管に達する . カロリメータ CEM のひとつのタワーには CPR2 の 6 つのチャンネルが対応する . CPR2 のチャンネル総数は 3072 となる . これを個別の光電子増倍

管で読み出すのは費用および設置場所の点から、現実的でない。したがって、ひとつの光電子増倍管で多チャンネルの読み出しが可能なマルチ・アノード型光電子増倍管 (MA-PMT) を用いる。これは、光陰極および増幅部 (ダイノード) は電氣的に共通であるが、アノードが空間的・電氣的に分割されている。2001 年度に基礎実験を行い性能を評価した結果、浜松ホトニクス社製の H8711A-10MOD (R5900-00-M16) を用いることが適当であると決定した。これは、4 mm x 4 mm のピクセルを 4 行 4 列に並べた構造をしており、一本あたり 16 チャンネルの信号読み出しが可能である (図 7.4)。

CPR2 検出器の全チャンネル数は 3072 であるので、192 本の MA-PMT が必要である。これまでに、試作機の測定を行い、ピクセル間での応答の一様性、応答線形性、クロス・トーク、増幅度などの観点から評価した。一様性は図 7.5 に示すように各ピクセルの中心での応答の分布の標準偏差は約 10% であり、充分小さい。応答線形性については、高電圧分割回路をテーパ型にするのが望ましいことが判明した。増幅度は -800 V の印加電圧で 10^6 程度と充分な値が得られている。読み出しエ

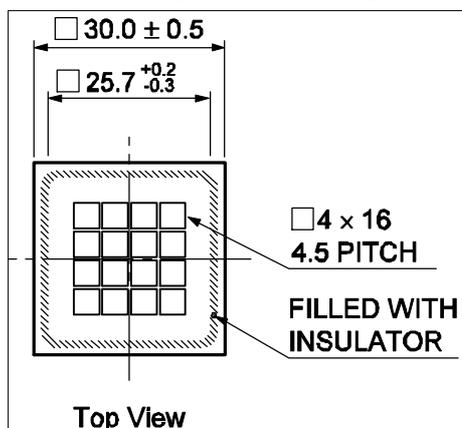


図 7.4: マルチ・アノード光電子増倍管 H8711 の模式図。

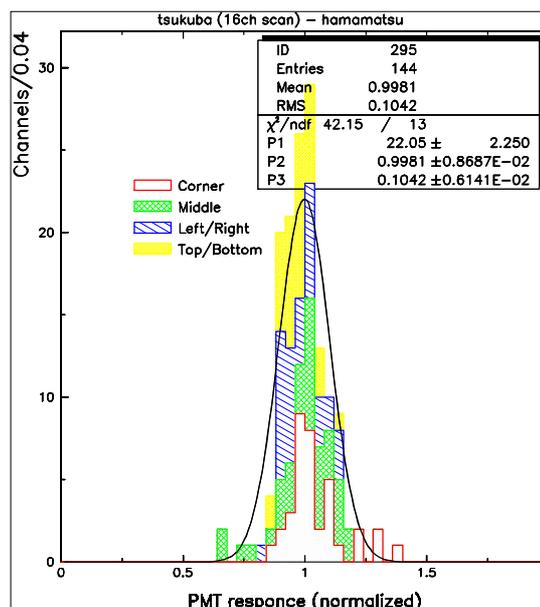


図 7.5: マルチ・アノード光電子増倍管 H8711 の応答のチャンネル間一様性。

レクトロニクスは既存のものを再利用する。ADC の分解能は 20 fC / count であり、最小電離粒子の通過により 10 個程度の光電子が得られ、その波高は 1.6 pC となる見込みである。クロス・トークは 1% 程度であり、許容範囲に収まっている。また、CDF 実験の環境下で期待される低磁場 (数ガウス) の影響はほとんどないことが確認された。さらに、CDF 実験での設置による要求から、アノード出力をケーブルでなくピンとする機械的な変更が加えられた。

以上の性能評価を経て、2002 年度末には実機 30 本の製作が開始された。CPR2 検出器の設置は 2005 年度に予定されており、2004 年度前半までに予備を含めて約 250 本の製作を行い、性能評価・校正データの取得を行う予定である。

【 7 】 今後の展望

テバトロン加速器および CDF 実験は、LHC 実験が運転を開始し物理結果を生み出し始める 2009 年頃までは、エネルギー・フロンティア実験としての位置を保ち、素粒子物理学における重要な成果を生み出すことが期待される。特に、テバトロンはトップクォークの生成が可能な唯一の加速器である。また、未発見のヒッグス粒子の生成についても同様である。さらに、超対称性粒子などの標準理論を超える新しい物理の直接探索においても CDF 実験は重要な役割を果たす。

現在進行中の Run a 実験はこれから 2 年程度の期間に 2 fb^{-1} 相当のデータを取得する見込みである。この間、テバトロン加速器の瞬間輝度は順次上昇し、 $2 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ となる予定である。その後の Run b 実験ではビーム輝度はさらに上昇する。これに対応するため、CDF 検出器もシリコン検出器の全面的な増強やカロリメータおよびデータ収集装置の増強などの対応が必要となる。2005 年度後半には半年程度の期間を用いて検出器の設置を行う予定である。すでに、検出器開発が進行中であり、一部建設も開始された。Run 実験での全データ量は、積分輝度 15 fb^{-1} が予測されている。以下、Run 実験で期待される成果を述べる。

トップクォークの物理

トップクォークは 1995 年に CDF 実験により発見されたが、これまでのところ全ての測定結果はデータの統計量によりその精度が決定されている。したがって、Run 実験でのデータ量の増加は測定精度の向上に大きく役立つはずである。

2 fb^{-1} のデータを用いると、トップクォークの対生成は、約 5000 事象が再構成される。トップクォークの質量は $3 \text{ GeV}/c^2$ の精度で測定される。生成断面積の測定により量子色力学の精密な検証がなされる。また、崩壊時に生成される W ボソンの偏極度の測定、t クォーク・反クォーク間のスピン偏極相関などを通して、標準模型の検証がなされる。さらに、トップクォークの荷電ヒッグス粒子への崩壊 $t \rightarrow \text{H}^+ \text{b}$ 、中性流による崩壊 $t \rightarrow \text{Z}^0 \text{c}/\text{u}$ 、重い新粒子共鳴状態のトップクォーク対への崩壊などの新しい物理の探索がなされる。一方、トップクォークの単一生成が観測されるはずであり、その生成断面積の測定により、部分幅 $\Gamma(t \rightarrow \text{b} \text{W}^+)$ および小林・益川行列要素 $|V_{\text{tb}}|$ の直接測定がなされる。

電弱相互作用の物理

2 fb^{-1} のデータを用いると W ボソンの質量が $30 \text{ MeV}/c^2$ の精度で測定される。トップク

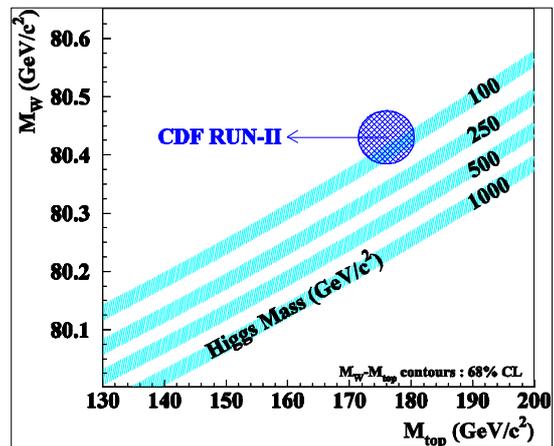


図 1: W ボソンの質量とトップクォークの質量。CDF Run a 実験 (2 fb^{-1}) で期待される精度を示す。帯は理論的に予測される関係をヒッグス粒子の質量について異なる値を仮定して示したものである。

オークの質量と組み合わせることにより、標準模型のヒッグス粒子に関する情報を得ることができ、約 30%の精度でその質量を推定できる(図1)。

また、 W ボソン、 WZ ボソン、 $W\gamma$ の対生成が数多く観測され、非可換ゲージ理論において現れる三重ゲージ・ボソン結合についての研究がなされる。 W ボソンの磁気能率の測定、 $W\gamma$ 生成での角度分布の輻射振幅零点などの測定がなされる。

B 粒子の物理

B ファクトリー実験での測定により B 粒子系での CP 対称性の破れが確立されたいま、B 粒子の物理は新たな段階に入ったと言える。CP 対称性の破れが小林・益川行列の複素位相によるという描像と矛盾しないが、それが唯一無二の起源なのか否かを明らかにするには、さらなる実験的検証が必要である。具体的には、ユニタリ三角形の辺の長さや角度を、なるべく多く(全て)、実験的に精度よくかつ理論的不定性の少ない方法で決定し、それらの間の整合性を確かめねばならない。CDF 実験では、Belle/BaBar 実験では不可能な B_s 中間子の崩壊を研究することにより有益な情報を得ることが可能である。三角形の辺 V_{td}/V_{ts} の長さは B_d^0 中間子と B_s^0 中間子の粒子・反粒子振動の振動数の比から精度よく決定しうる。 B_s^0 中間子の粒子・反粒子振動の観測は期待される振動数が非常に高いため実験的に容易ではないが、SVT トリガーにより収集された崩壊様式 $B_s^0 \rightarrow D_s^- \pi^+$ を用いて観測されるはずである。また、 $B_d^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ と $B_s^0 \rightarrow K^+ K^-$ の崩壊率の CP 非対称度を測定し、それらを同時に用いることにより、 V_{td} の複素位相である角度 γ を決定する。これらふたつの情報を B^0

$J/\psi K_s^0$ から得られる角度 β の測定と組み合わせることにより、ユニタリ三角形が閉じるか否かの最初の有意な検証となる。

CP 対称性の破れの物理以外にも、異なる B 粒子種間の寿命の違いの精密測定、B 中間子・D 中間子の稀崩壊の探索、 B_c 中間子の質量・寿命・分岐比の精密測定など、数多くの成果が期待される。

強い相互作用の物理

新たな重心系エネルギー 2 TeV において種々の過程・終状態を用いた測定が運動学的変数のより広い領域について高統計で実現し、量子色力学(QCD)の精密検証がなされる。

ジェットの測定は、これまで最大横運動量が 415 GeV まで測定されているが、Run a 実験ではこれが 550 GeV へと大きく拡大し、さらに Run b 実験では 600 GeV まで観測可能である。高い x での陽子構造関数の決定、複合粒子のエネルギー・スケールの探索の観点から重要な情報を得られる。2 ジェット系の質量分布の測定では重い新粒子の共鳴状態を探ることができる。たとえばアクシグルオンに対しその質量 1.2 TeV の領域まで排除可能である。

光子の直接生成の研究は、光子がパートンであることから、ハドロ化の影響を受けるジェットより、QCD 理論とのより厳密かつ直接的な比較が可能となる。Run 実験での測定では、小さな x での構造関数の理解、QCD での記述では不十分な光子の横運動量の存在の示唆などの結果をもたらしたが、これらをさらに精度よく測定してゆく。特に 2 光子生成事象を用いるとパートンの横運動量の直接測定が可能である。また、この過程は、LHC 実験での $H \rightarrow \gamma\gamma$ によるヒッグス粒子探索の際の

バックグラウンドにたいする知見を与える点で重要である。

ボトム・チャームなどの重いクォークを含む粒子の生成は、摂動論的計算が生成粒子のすべての位相空間について可能であり、また終状態が良く定義されるため、重要な測定となる。ボトム粒子の生成についてはRun0・Run

実験での結果は理論値のおよそ2倍の値を示している。この解釈・理解は未だ得られていないが、Run 実験においては、SVTトリガーを用いることによりボトム粒子のみならず膨大な統計量のチャーム粒子の収集・再構成に成功しており、これらの粒子の生成について詳細な測定が得られる。重いクォークとその反クォークの束縛状態であるクォークオニウム、特にJ/ψ粒子の生成率に関して、Run 実験のデータは、理論値の約50倍という驚くべき結果を示した。カラー・オクテット模型など何らかの新たな生成機構が存在せねばならないことは明白であり、特にJ/ψ粒子の偏極度の測定がいろいろな生成機構を識別するのに有効であることが知られている。Run 実験での偏極度の測定はカラー・オクテット模型の予言とは異なる結果を示しており興味深い。J/ψ粒子はそのミュオン対への崩壊により効率よく収集されるが、Run 実験ではその横運動量の閾値が2.2 GeV/cから1.5 GeV/cへと下げられたため、J/ψ粒子の横運動量について0までの領域がすべて有感となった。これはまた、偏極度の測定がより少ない系統誤差を持って行えることを意味する。さらに、統計量の増加により、高運動量領域での測定の精度が高まる。

ヒッグス粒子探索

ゲージ対称性の自発的破れを引き起こし、

ゲージ・ボソンに質量を与える役割を担うヒッグス機構は標準理論で唯一直接検証のなされてない領域であり、その研究は素粒子物理の当面の最重要課題であるといえる。ヒッグス粒子の直接探索はLEP- 実験などで行われ、質量の下限114 GeV/c²が得られている。テバトロンでのヒッグス粒子の生成断面積は図2に示す通りである。また、その崩壊分岐比を図3に示す。質量120 GeV/c²程度までの軽いヒッグス粒子はボトムクォーク対に崩壊する様式が支配的である。

トップクォークのループを介した素過程gg hによる単独生成の断面積が一番大きい

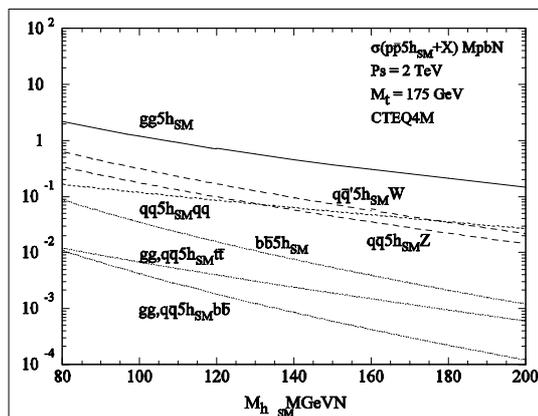


図2：重心系エネルギー2 TeVの陽子・反陽子衝突における標準理論のヒッグス粒子の生成断面積を質量の関数として示したもの。

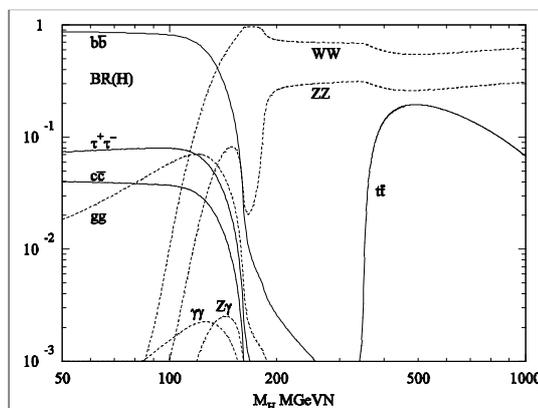


図3：標準模型ヒッグス粒子の崩壊分岐比。

その終状態は通常のボトムクォーク対生成のバックグラウンドに完全に埋もれてしまう。したがって、テバトロンでのヒッグス探索で最も有望なのは W ボソンあるいは Z ボソンとの随伴生成を検出することである。終状態は W ボソンあるいは Z ボソンとボトムクォーク対である。トップクォーク探索の際と同様にボトムクォークのジェットを同定し、それらの対の不変質量分布に信号を探す。

ヒッグス粒子が 150 GeV/c² 程度以上の重い場合には、W ボソン対あるいは Z ボソン対への崩壊が主となる。これらはきわめて特徴的な終状態であり、単一生成も含めて探索の感度は良い。140 GeV/c² 程度の中間質量領域では、ヒッグス粒子の W ボソン対への崩壊で W ボソンの片方が仮想粒子である場合が重要となる。随伴生成による W ボソンを含めて、一事象中に三つの W ボソンが存在し、それらのうちふたつは必ず同電荷を持つ。したがって、それらが共にレプトンに崩壊した場合、同符号であるという特徴的な信号となる。三つの W ボソンが全てレプトンに崩壊した場合はさらにバックグラウンドは少ない。

テバトロンでの標準理論のヒッグス粒子探索可能性を図 4 に示す。縦軸は、ヒッグス粒子探索に必要なデータ量であり、fb⁻¹ を単位としている。横軸はヒッグス粒子の質量である。三つの帯は、下から順に、(1) その質量に存在しない場合に信頼度 95%で排除する、(2) 3 標準偏差で存在の証拠を示す、(3) 5 標準偏差で発見する、という条件に対応している。2 fb⁻¹ のデータで 120 GeV/c² 以下の領域での探索が可能である。30 fb⁻¹ を蓄積すれば 180 GeV/c² 以下のヒッグス粒子の存在の証拠が示せる。

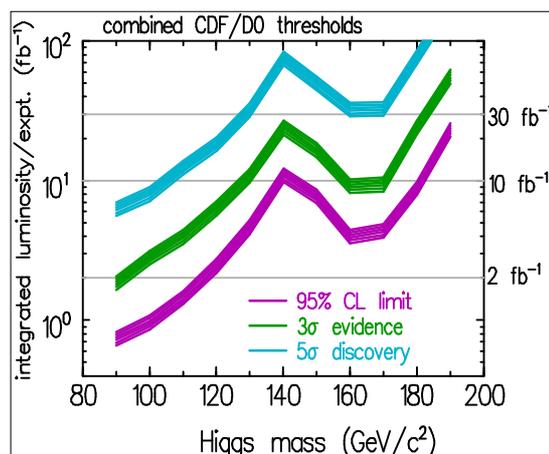


図 4: テバトロンでの標準理論のヒッグス粒子探索可能性。

標準理論を超える物理の探索

標準模型を超えるいくつかの理論は 100 - 200 GeV/c² の質量領域で新たな現象が現れることを予言している。超対称性 (SUSY), テクニカラー, 新たな U(1) 対称性, トップ・カラーなどの理論では、新粒子の生成断面積はこの質量領域では 10 - 1000 fb と予想している。これらは Run で到達できる範囲にある。以下、これらの可能性について述べる。

MSSM については複数の様式での探索を行う。

- (1) 終状態に三つのレプトンを含む事象を用いることで、チャージーノ・ニュートラリーノ対が生成されてそれぞれがレプトンに崩壊するモード $\tilde{c}_1^+ \tilde{c}_2^0 \rightarrow (\ell^+ n \tilde{c}_1^0)(\ell^+ \ell^- \tilde{c}_1^0)$ を少ないバックグラウンドで探索できる。Run のチャージーノの下限值 68 GeV/c² は 130 GeV/c² まで押し上げられる。特定の MSSM パラメータでは 210 GeV/c² でも発見が可能で、LEP での探索範囲を大きく拡大する。
- (2) 多ジェット + 消失横エネルギーの様式では、強い相互作用で生成されるグルイーノ対、スクォーク対、グルイーノ・スクォーク対が探索可能である。グルイーノとスクォークの質量が同じと仮定すると、95% 信頼度でおよ

そ 270 GeV/c² まで排除可能である。

(3) グルイーノやスクォークの探索は、同符号レプトン対+多ジェット+消失横エネルギーの様式でも行える。これは、多ジェット+消失横エネルギーの様式と相補的であり、ふたつの結果を統合すれば探索領域を広げることができる。

(4) ストップはトップの質量が重いことから他のスクォークと比較して軽い可能性が指摘されている。質量が 150 GeV/c² 以下ならばバックグラウンドに対して 5 標準偏差の有意さでストップを発見できる。

Z' や W' などの新たなゲージ粒子は標準模型の自然な拡張や左右対称模型などで予想されている。Run 1 では Z' に対しては 900 - 1000 GeV/c² まで W' に対しては 990 GeV/c² まで探索が可能である。

2 ジェットの不变質量分布から 2 ジェット終状態に崩壊する新粒子共鳴状態の探索を引き続き行う。質量下限はデータ量とともに向上する。

トップの質量が極めて重いことから、トップのみに強く結合するゲージ粒子 Z_{topC}' が予測されている (トップ・カラー模型)。Z_{topC}' はボトム対やトップ対に崩壊することから、900 GeV/c² までは 5 標準偏差の有意さで発見できる。

レプトクォークは、レプトンとクォーク間の対称性を仮定する多くの理論で存在が要求される。CDF ではレプトクォークの対生成から発生するレプトン対+2 ジェットを用いる方法と中性 B 中間子の eμ への崩壊様式を用いる方法でレプトクォークを探索している。第二世代のレプトクォークについては 300 GeV/c² まで、第一世代は 350 GeV/c² まで探索可能である。レプトンを第四世代のクォーク

と考える Pati-Salam 模型では、レプトクォークが同じ世代に属するレプトンとクォークに崩壊するという制約はなく、B → eμ などの崩壊が現れる。Run 1 ではこの様式から 12 - 15 TeV/c² の質量下限を得ているが、Run 2 ではさらに拡張される。

複合粒子模型ではクォークの励起状態 q* が期待される。q* の探索は終状態にレプトン+ゲージ粒子 (g, W, Z, γ) を含む様式で行われ、質量 820 GeV/c² まで探索可能である。

重い安定粒子は超対称性、テクニカラー、複合粒子模型など様々な模型で予言されている。透過性のある速度の遅い粒子を TOF 検出器などを用いて探すことで、380 - 520 GeV/c² (新粒子がどのカラー多重項に属するかに依存する) の領域で探索可能である。

テクニカラーは素粒子としてテクニクォークを想定し、その束縛状態であるテクニ中間子が対称性の破れを引き起こすと考える。テクニ ρ 粒子について 770 GeV/c² まで探索可能である。

荷電ヒッグス粒子も標準模型を超える多くの理論で予言されている。CDF Run 1 実験では、トップ崩壊で生成した荷電ヒッグス粒子が τ に崩壊する様式を探索し、tan β が大きい領域で荷電ヒッグス粒子の質量に 140 GeV/c² の下限を与えた。tan β が小さい領域では、トップ崩壊の電子・μ 粒子への分岐比が標準模型による値より減少することを利用して、間接的探索を行っている。Run 2 では統計量の増加により、より広範囲での探索が可能となる。

【 8 】 自己評価

CDF 実験は 1979 年にグループを結成し、検出器の設計を開始した。その後、1987 年に陽子反陽子衝突型加速器テバトロンと CDF 検出器を共に完成し、実験を開始した。それ以来、世界最高エネルギーの衝突実験として高エネルギー物理学の発展に大いに寄与してきた。例えば、 W ・ Z ボソンの質量測定、ジェット生成断面積の測定、 B ハドロンの質量・寿命測定などによって、電弱統一理論、 QCD 、 B の物理、新粒子探索の研究を進展させてきた。なかでも 1994 年 4 月に発表されたトップクォークの発見は素粒子物理学史上でも重要な成果であった。この発見に続いて行なわれたトップクォークの質量の精密測定は W ボソンの質量測定の結果とあわせて質量の起源であるヒッグス粒子の質量に強い制限を与えた。さらに、1998 年 3 月に最後の中間子である B_c 中間子を発見した。

CDF 実験日本グループは 1979 年の結成時から CDF に参加して、検出器の設計・製作・運転と物理の解析に重要な役割をはたしてきた。具体的には、プラグ電磁カロリメータと超伝導ソレノイドコイルは日本グループ単独で設計・製作し、また中央電磁カロリメータ、VTPC 飛跡検出器、CMUP ミュー粒子検出器は共同で製作した。物理の解析でも、日本グループは電弱統一理論、 QCD 、 B の物理、新粒子探索の研究を進展させる多くの測定結果を発表してきた。そのことは、この報告の末尾の博士論文リストを見れば明らかである。またトップクォークの発見においても、トップクォーク発見法と質量決定法を提案し、レプトン+ジェットのチャンネルではトップクォークの質量を求める解析で、また 2 レプトン

のチャンネルでは信号同定とバックグラウンドの評価で貢献した。また B_c 中間子の発見では、中心となって解析を行い、その結果は筑波大学院生の博士論文となっている。

CDF 実験を行なううえで、これまで問題となったことをあげると、

(1) 資金前渡官吏として、国立大学・国立研究所の教官が一人フェルミ研究所に常駐しなければならない。これは、特に教育の義務のある大学の教官にとっては難しい。1 年の中で複数回、代行を可能にするようにはできないだろうか？ そうなれば、大学の教官も資金前渡官吏の任務を行なうことが容易になる。例えば、最初の 4 カ月を A 氏が、次の 4 カ月を B 氏が、最後の 4 カ月をまた A 氏が行なうというようにする。こうすれば、A 氏、B 氏共に大学の講義の義務を果たしながら、資金前渡官吏の任務を行なうことができる。

(2) CDF 実験では物理の解析のテーマが豊富である。1992 年～1996 年に収集されたデータの解析が 2003 年の現在まで行われている。これは物理の解析のマンパワーが不足しているためである。日本国内の大学・研究所で CDF 実験に興味をもつ人々の参加を強く望む。特に LHC 実験/LC 実験に参加している人々は、CDF 実験を遂行することによって、その検出器と物理解析の経験を LHC 実験/LC 実験に生かせるので、参加を強く勧める。実際に、欧米の大学・研究所からは多くの人々がテバトロンの CDF/DO と LHC/LC の両方に参加している。

(3) CDF 実験の検出器の設計・製作・運転と物理の解析で日本グループの多くの若手スタッフや大学院生が活躍しているが、彼らは日本国内で意外に知られていない。このことの一因として、CDF 実験に参加している日本

国内の大学・研究所及び人が少ないことが挙げられる。この問題を解消するためにも、日本国内の大学・研究所で CDF 実験に興味をもつ人々の参加を強く望む。

以上に挙げた問題をある程度解消する方策として、大学・研究所間の人事交流を活発にすることが考えられる。例えば、研究所と大学との間で連携大学院のような制度を設けることができるようになれば、教官・学生の相互乗り入れが活発になり、上記の問題解決の一助になる。

【 9 】 研究成果のリスト

- 1 . Publication
- 2 . Conference Talks
- 3 . Ph . D. Theses

Publication

1. "Measurement of the differential cross section for events with large total transverse energy in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"
Phys. Rev. Lett. 80 (1998) 3461-3466
F. Abe et al. (CDF Collab.)
2. "Search for chargino-neutralino associated production at the Fermilab Tevatron Collider"
Phys. Rev. Lett. 80 (1998) 5275-5280
F. Abe et al. (CDF Collab.)
3. "Observation of hadronic W decays in $t\bar{t}$ events with the Collider Detector at Fermilab"
Phys. Rev. Lett. 80 (1998) 5720-5725
F. Abe et al. (CDF Collab.)
4. "Measurement of the $\sigma(W+\geq 1\text{Jet})/\sigma(W)$ cross section ratio from $\bar{p}p$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"
Phys. Rev. Lett. 81 (1998) 1367-1372
F. Abe et al. (CDF Collab.)
5. "Searches for new physics in diphoton events in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"
Phys. Rev. Lett. 81 (1998) 1791-1796
F. Abe et al. (CDF Collab.)
6. "Observation of the B_c meson in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"
Phys. Rev. Lett. 81 (1998) 2432-2437
F. Abe et al. (CDF Collab.)
7. "Search for second generation leptoquarks in the dimuon plus dijet channel of $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"
Phys. Rev. Lett. 81 (1998) 4806-4811
F. Abe et al. (CDF Collab.)
8. "Events with a rapidity gap between jets in $\bar{p}p$ collisions at $\sqrt{s} = 630$ GeV"
Phys. Rev. Lett. 81 (1998) 5278-5283
F. Abe et al. (CDF Collab.)
9. "Measurement of the CP -violation parameter $\sin(2\beta)$ in $B_d^0/\bar{B}_d^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$ decays"
Phys. Rev. Lett. 81 (1998) 5513-5518
F. Abe et al. (CDF Collab.)
10. "Search for the decays $B_s^0, B_d^0 \rightarrow e^\pm \mu^\mp$ and Pati-Salam leptoquarks"
Phys. Rev. Lett. 81 (1998) 5742-5747
F. Abe et al. (CDF Collab.)

11. "Search for Higgs bosons produced in association with a vector boson in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"
 Phys. Rev. Lett. **81** (1998) 5748-5753
 F. Abe et al. (CDF Collab.)
12. "Measurement of the lepton charge asymmetry in W -boson decays produced in $p\bar{p}$ collisions"
 Phys. Rev. Lett. **81** (1998) 5754-5759
 F. Abe et al. (CDF Collab.)
13. "Search for the decays $B_d^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ and $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"
 Phys. Rev. D**57** (1998) R3811-R3816
 F. Abe et al. (CDF Collab.)
14. "Measurement of B hadron lifetimes using J/ψ final states at CDF"
 Phys. Rev. D**57** (1998) 5382-5401
 F. Abe et al. (CDF Collab.)
15. "Search for the rare decay $W^\pm \rightarrow \pi^\pm + \gamma$ in proton-antiproton collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"
 Phys. Rev. D**58** (1998) 031101-1-5
 F. Abe et al. (CDF Collab.)
16. "Search for long-lived parents of Z^0 bosons in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"
 Phys. Rev. D**58** (1998) 051102-1-5
 F. Abe et al. (CDF Collab.)
17. "Observation of $B^+ \rightarrow \psi(2S)K^+$ and $B^0 \rightarrow \psi(2S)K^*(892)^0$ decays and measurements of B -meson branching fractions into J/ψ and $\psi(2S)$ final states"
 Phys. Rev. D**58** (1998) 072001-1-15
 F. Abe et al. (CDF Collab.)
18. "Measurement of the B^- and \bar{B}^0 meson lifetimes using semileptonic decays"
 Phys. Rev. D**58** (1998) 092002-1-12
 F. Abe et al. (CDF Collab.)
19. "Search for the rare decay $W^\pm \rightarrow D_s^\pm + \gamma$ in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"
 Phys. Rev. D**58** (1998) 091101-1-5
 F. Abe et al. (CDF Collab.)
20. "Observation of B_c mesons in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"
 Phys. Rev. D**58** (1998) 112004-1-29
 F. Abe et al. (CDF Collab.)
21. "Measurement of the B_d^0 - \bar{B}_d^0 flavor oscillation frequency and study of same side flavor

- tagging of B mesons in $p\bar{p}$ collisions”
 Phys. Rev. D59 (1998) 032001-1-41
 F. Abe et al. (CDF Collab.)
22. “Optimal P-stop pattern for the N-side strip isolation of silicon microstrip detectors”
 IEEE Trans. Nucl. Sci. 45 (1998) 303-309
 Y. Iwata, T. Ohsugi, K. Fujita, H. Kitabayashi, K. Yamamoto, K. Yamamura, Y. Unno, T. Kondo, S. Terada, T. Kohriki, M. Asai, I. Nakano, R. Takashima
23. “Radiation hardness and mechanical durability of Kuraray optical fibers”
 Nucl. Inst. Meth. A411 (1998) 31-40
 K. Hara, K. Hata, S. Kim, M. Mishina, M. Sano, Y. Seiya, K. Takikawa, M. Tanaka, K. Yasuoka
24. “Measurement of the top quark mass with the Collider Detector at Fermilab”
 Phys. Rev. Lett. 82 (1999) 271-276
 F. Abe et al. (CDF Collab.)
25. “Search for new particles decaying to $b\bar{b}$ in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV”
 Phys. Rev. Lett. 82 (1999) 2038-2043
 F. Abe et al. (CDF Collab.)
26. “Search for third-generation leptoquarks from technicolor models in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV”
 Phys. Rev. Lett. 82 (1999) 3206-3211
 F. Abe et al. (CDF Collab.)
27. “Search for B_s^0 - \bar{B}_s^0 oscillations using the semileptonic decay $B_s^0 \rightarrow \phi\ell^+X\nu$ ”
 Phys. Rev. Lett. 82 (1999) 3576-3580
 F. Abe et al. (CDF Collab.)
28. “Search for R -parity violating supersymmetry using like-sign dielectrons in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV”
 Phys. Rev. Lett. 83 (1999) 2133-2138
 F. Abe et al. (CDF Collab.)
29. “Search for a technicolor ω_T particle in events with a photon and a b -quark jet at Fermilab”
 Phys. Rev. Lett. 83 (1999) 3124-3129
 F. Abe et al. (CDF Collab.)
30. “Search for the flavor-changing neutral current decays $B^+ \rightarrow \mu^+\mu^-K^+$ and $B^0 \rightarrow \mu^+\mu^-K^{*0}$ ”
 Phys. Rev. Lett. 83 (1999) 3378-3383

- T. Affolder et al. (CDF Collab.)
31. "Measurement of the B_s^0 meson lifetime using semileptonic decays"
Phys. Rev. D59 (1999) 032004-1-14
F. Abe et al. (CDF Collab.)
 32. "Measurement of Z^0 and Drell-Yan production cross section using dimuons in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"
Phys. Rev. D59 (1999) 052002-1-15
F. Abe et al. (CDF Collab.)
 33. "Kinematics of $t\bar{t}$ events at CDF"
Phys. Rev. D59 (1999) 092001-1-20
F. Abe et al. (CDF Collab.)
 34. "Searches for new physics in diphoton events in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"
Phys. Rev. D59 (1999) 092002-1-29
F. Abe et al. (CDF Collab.)
 35. "Measurement of the $B_d^0\bar{B}_d^0$ oscillation frequency using dimuon data in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"
Phys. Rev. D60 (1999) 51101-1-6
F. Abe et al. (CDF Collab.)
 36. "Measurement of $B^0\bar{B}^0$ flavor oscillations using jet-charge and lepton flavor tagging in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"
Phys. Rev. D60 (1999) 072003-1-22
F. Abe et al. (CDF Collab.)
 37. "Measurement of the associated $\gamma + \mu^\pm$ production cross section in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"
Phys. Rev. D60 (1999) 092003-1-5
F. Abe et al. (CDF Collab.)
 38. "Measurement of b quark fragmentation fractions in the production of strange and light B mesons in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"
Phys. Rev. D60 (1999) 092005-1-14
F. Abe et al. (CDF Collab.)
 39. "Measurement of the $B^0\bar{B}^0$ oscillation frequency using l^-D^{*+} pairs and lepton flavor tags"
Phys. Rev. D60 (1999) 112004-1-12
T. Affolder et al. (CDF Collab.)
 40. "Mass production of tile/fiber units for the CDF plug upgrade EM calorimeter"

- Nucl. Inst. Meth. A420 (1999) 48-61
S. Aota, T. Asakawa, K. Hara, E. Hayashi, S. Kim, K. Kondo, T. Kuwabara, S. Miyashita, H. Nakada, I. Nakano, Y. Seiya, T. Takebayashi, K. Takikawa, H. Toyoda, T. Uchida, K. Yasuoka, M. Mishina, J. Iwai
41. "A preshower detector for the CDF Plug Upgrade: test beam results"
Nucl. Inst. Meth. A431 (1999) 104-111
M. Albrow, S. Aota, T. Asakawa, Y. Fukui, T. Handa, K. Hatakeyama, H. Ikeda, J. Iwai, T. Kikuchi, S.H. Kim, H. Minato, H. Nakada, Y. Seiya et al.
42. "The intermediate silicon layers detector at CDF II: Design and progress"
Nucl. Inst. Meth. A435 (1999) 44-50
A. Affolder, K. Hara, Y. Kato, Y. Miyazaki, T. Okusawa, M. Shimojima, T. Takano, K. Takikawa, T. Yoshida et al.
43. "Prototype Si microstrip sensors for the CDF-II ISL detector"
Nucl. Inst. Meth. A435 (1999) 437-445
K. Hara, K. Hata, K. Kanao, S. Kim, M. Ogasawara, T. Ohsugi, M. Shimojima, K. Takikawa
44. "Design optimization of radiation-hard, double-sided, double-metal, AC-coupled silicon sensors"
Nucl. Inst. Meth. A436 (1999) 272-280
T. Ohsugi, Y. Iwata, T. Ohmoto, T. Handa, K. Fujita, H. Kitabayashi, K. Sato, H. Satoh, R. Takashima, I. Nakano, K. Yamamoto, K. Yamamura
45. "The CDF Intermediate Silicon Layers detector"
Nucl. Phys. Proc. Suppl. 78 (1999) 307-310
P. Azzi-Bacchetta, K. Hara, Y. Kato, Y. Miyazaki, T. Okusawa, M. Shimojima, T. Takano, K. Takikawa et al.
46. "The CDF intermediate silicon layers detector"
Nuovo Cimento 112A (1999) 1351-1357
A. Affolder, K. Hara, Y. Kato, Y. Miyazaki, T. Okusawa, M. Shimojima, T. Takano, K. Takikawa, T. Yoshida et al.
47. "Measurement of the helicity of W bosons in top quark decays"
Phys. Rev. Lett. 84 (2000) 216-221
T. Affolder et al. (CDF Collab.)
48. "Observation of diffractive b -quark production at the Fermilab Tevatron"
Phys. Rev. Lett. 84 (2000) 232-237
T. Affolder et al. (CDF Collab.)

49. "Search for a fourth-generation quark more massive than the Z^0 boson in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"
Phys. Rev. Lett. 84 (2000) 835-840
T. Affolder et al. (CDF Collab.)
50. "Transverse momentum and total cross section of e^+e^- pairs in the Z -boson region from $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"
Phys. Rev. Lett. 84 (2000) 845-850
T. Affolder et al. (CDF Collab.)
51. "Search for color singlet technicolor particles in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"
Phys. Rev. Lett. 84 (2000) 1110-1115
T. Affolder et al. (CDF Collab.)
52. "Measurement of b -quark fragmentation fractions in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"
Phys. Rev. Lett. 84 (2000) 1663-1668
T. Affolder et al. (CDF Collab.)
53. "Production of $\Upsilon(1S)$ mesons from χ_b decays in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"
Phys. Rev. Lett. 84 (2000) 2094-2099
T. Affolder et al. (CDF Collab.)
54. "Diffractive dijets with a leading antiproton in $\bar{p}p$ collisions at $\sqrt{s} = 1800$ GeV"
Phys. Rev. Lett. 84 (2000) 5043-5048
T. Affolder et al. (CDF Collab.)
55. "Search for scalar top quark production in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"
Phys. Rev. Lett. 84 (2000) 5273-5278
T. Affolder et al. (CDF Collab.)
56. "Search for scalar top and scalar bottom quarks in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"
Phys. Rev. Lett. 84 (2000) 5704-5709
T. Affolder et al. (CDF Collab.)
57. "Search for a W' boson via the decay mode $W' \rightarrow \mu\nu_\mu$ in 1.8 TeV $p\bar{p}$ collisions"
Phys. Rev. Lett. 84 (2000) 5716-5721
F. Abe et al. (CDF Collab.)
58. "Limits on light gravitino production and new processes with large missing transverse energy in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"
Phys. Rev. Lett. 85 (2000) 1378-1383
T. Affolder et al. (CDF Collab.)
59. "Search for second and third generation leptoquarks including production via technicolor interactions in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"

- Phys. Rev. Lett. 85 (2000) 2056-2061
T. Affolder et al. (CDF Collab.)
60. "Search for new particles decaying to $t\bar{t}$ in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"
Phys. Rev. Lett. 85 (2000) 2062-2067
T. Affolder et al. (CDF Collab.)
61. "Measurement of J/ψ and $\psi(2S)$ polarization in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"
Phys. Rev. Lett. 85 (2000) 2886-2891
T. Affolder et al. (CDF Collab.)
62. "Direct measurement of the W boson width in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"
Phys. Rev. Lett. 85 (2000) 3347-3352
T. Affolder et al. (CDF Collab.)
63. "Dijet production by double pomeron exchange at the Fermilab Tevatron"
Phys. Rev. Lett. 85 (2000) 4215-4220
T. Affolder et al. (CDF Collab.)
64. "Measurement of the decay amplitudes of $B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0}$ and $B_s^0 \rightarrow J/\psi \phi$ decays"
Phys. Rev. Lett. 85 (2000) 4668-4673
T. Affolder et al. (CDF Collab.)
65. "Measurement of $b\bar{b}$ rapidity correlations in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"
Phys. Rev. D61 (2000) 032001-1-18
F. Abe et al. (CDF Collab.)
66. "Measurement of $\sin 2\beta$ from $B \rightarrow J/\psi K_S^0$ with the CDF detector"
Phys. Rev. D61 (2000) 072005-1-16
T. Affolder et al. (CDF Collab.)
67. "Measurement of the differential dijet mass cross section in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"
Phys. Rev. D61 (2000) 091101-1-6
T. Affolder et al. (CDF Collab.)
68. "Search for the charged Higgs Boson in the decays of top quark pairs in the $e\tau$ and $\mu\tau$ channels at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"
Phys. Rev. D62 (2000) 012004-1-7
T. Affolder et al. (CDF Collab.)
69. "Consumer-Server/Logger system for the CDF experiment"
IEEE Trans. Nucl. Sci. 47 (2000) 236-239
M. Shimojima, B.J. Kilminster, K.S. McFarland, A. Vaiciulis, D.J. Holmgren
70. "Results from a 20 scintillator bar time-of-flight test system located inside the 1.4 T

CDF solenoid”

Nucl. Inst. Meth. A439 (2000) 65-79

F. Ukegawa, J.G. Heinrich, N.S. Lockyer, O. Long, W. Kononenko, T. Gao, F.M. Newcomer, R. Van Berg, R. Kephart, S. Mori, K. Kondo

71. “Cosmic-ray tests for quality control of the CDF plug upgrade EM calorimeter and the CDF plug preshower detector”

Nucl. Inst. Meth. A452 (2000) 67-80

T. Asakawa, K. Hara, K. Hata, T. Kadotani, H. Kawamoto, T. Kikuchi, S.H. Kim, K. Kondo, T. Kuwabara, M. Okura, H. Okutomi, M. Sano, Y. Seiya, T. Shibayama, T. Suzuki, S. Takashima, K. Takikawa, M. Tanaka, Y. Tanaka, T. Uchida, T. Watanabe

72. “Intermediate silicon layers detectors for the CDF experiment”

Nucl. Inst. Meth. A453 (2000) 84-88

A. Affolder, K. Hara, Y. Kato, Y. Miyazaki, T. Okusawa, M. Shimojima, H. Suzuki, T. Takano, K. Takikawa, M. Tanaka, Y. Taniguchi, T. Yoshida et al.

73. “First measurement of the ratio $B(t \rightarrow Wb)/B(t \rightarrow Wq)$ and associated limit on the Cabibbo-Kobayashi-Maskawa element $|V_{tb}|$ ”

Phys. Rev. Lett. 86 (2001) 3233-3238

T. Affolder et al. (CDF Collab.)

74. “Production of χ_{c1} and χ_{c2} in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV”

Phys. Rev. Lett. 86 (2001) 3963-3968

T. Affolder et al. (CDF Collab.)

75. “Search for neutral supersymmetric Higgs bosons in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV”

Phys. Rev. Lett. 86 (2001) 4472-4478

T. Affolder et al. (CDF Collab.)

76. “Measurement of the top quark p_T distribution”

Phys. Rev. Lett. 87 (2001) 102001-1-6

T. Affolder et al. (CDF Collab.)

77. “Measurement of $d\sigma/dM$ and forward-backward charge asymmetry for high-mass Drell-Yan e^+e^- pairs from $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV”

Phys. Rev. Lett. 87 (2001) 131802-1-6

T. Affolder et al. (CDF Collab.)

78. “Double diffraction dissociation at the Fermilab Tevatron collider”

Phys. Rev. Lett. 87 (2001) 141802-1-6

T. Affolder et al. (CDF Collab.)

79. "Charged-particle multiplicity in jets in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"
Phys. Rev. Lett. 87 (2001) 211804-1-6
T. Affolder et al. (CDF Collab.)
80. "Search for quark-lepton compositeness and a heavy W' boson using the $e\nu$ channel in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"
Phys. Rev. Lett. 87 (2001) 231803-1-6
T. Affolder et al. (CDF Collab.)
81. "Observation of diffractive J/ψ production at the Fermilab Tevatron"
Phys. Rev. Lett. 87 (2001) 241802-1-6
T. Affolder et al. (CDF Collab.)
82. "Search for gluinos and squarks using like-sign dileptons in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"
Phys. Rev. Lett. 87 (2001) 251803-1-6
T. Affolder et al. (CDF Collab.)
83. "Measurement of $d\sigma/dy$ for high-mass Drell-Yan e^+e^- pairs from $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"
Phys. Rev. D63 (2001) 011101-1-6
T. Affolder et al. (CDF Collab.)
84. "Measurement of the top quark mass with the collider detector at Fermilab"
Phys. Rev. D63 (2001) 032003-1-43
T. Affolder et al. (CDF Collab.)
85. "Tests of enhanced leading order QCD in W boson plus jets events from 1.8 TeV $p\bar{p}$ collisions"
Phys. Rev. D63 (2001) 072003-1-29
T. Affolder et al. (CDF Collab.)
86. "Search for the supersymmetric partner of the top quark in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"
Phys. Rev. D63 (2001) 091101-1-6
T. Affolder et al. (CDF Collab.)
87. "Measurement of the two-jet differential cross section in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1800$ GeV"
Phys. Rev. D64 (2001) 012001-1-8; Erratum-ibid. D65 (2002) 039902-1
T. Affolder et al. (CDF Collab.)
88. "Measurement of the inclusive jet cross section in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"
Phys. Rev. D64 (2001) 032001-1-38; Erratum-ibid. D65 (2002) 039903-1

- T. Affolder et al. (CDF Collab.)
89. "Measurement of the $t\bar{t}$ production cross section in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"
Phys. Rev. D64 (2001) 032002-1-38
T. Affolder et al. (CDF Collab.)
90. "Measurement of the W boson mass with the Collider Detector at Fermilab"
Phys. Rev. D64 (2001) 052001-1-39
T. Affolder et al. (CDF Collab.)
91. "Observation of orbitally excited B mesons in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"
Phys. Rev. D64 (2001) 072002-1-16
T. Affolder et al. (CDF Collab.)
92. "Search for narrow diphoton resonances and for $\gamma\gamma + W/Z$ signatures in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"
Phys. Rev. D64 (2001) 092002-1-11
T. Affolder et al. (CDF Collab.)
93. "Cross section and heavy quark composition of $\gamma + \mu$ events produced in $p\bar{p}$ collisions"
Phys. Rev. D65 (2001) 012003-1-7
T. Affolder et al. (CDF Collab.)
94. "A Time-of-flight Detector for CDF"
Int. J. Mod. Phys. A16 Suppl. 1C (2001) 1119-1121
G. Grozis, A. Kazama, S.H. Kim, H. Matsunaga, S. Motohashi, K. Sato, K. Takikawa, F. Ukegawa et al.
95. "Design and performance tests of the CDF time-of-flight system"
Nucl. Inst. Meth. A461 (2001) 579-581
Ch. Paus, A. Kazama, S.H. Kim, H. Matsunaga, S. Motohashi, K. Sato, K. Takikawa, F. Ukegawa et al.
96. "A flexible front-end electronics hybrid for silicon microstrip detectors"
Nucl. Inst. Meth. A466 (2001) 390-396
Y. Iwata, T. Ohsugi, T. Ohmoto, T. Handa, K. Sato, H. Yamamoto, R. Takashima, I. Nakano et al.
97. "The Time of Flight Detector at CDF"
Nucl. Phys. Proc. Suppl. 93 (2001) 344-347
G. Grozis, A. Kazama, S.H. Kim, H. Matsunaga, S. Motohashi, K. Sato, K. Takikawa, F. Ukegawa et al.
98. "Search for gluinos and scalar quarks in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV using the missing energy plus multijets signature"

- Phys. Rev. Lett. 88 (2002) 041801-1-6
T. Affolder et al. (CDF Collab.)
99. "Measurement of the strong coupling constant from inclusive jet production at the Tevatron $p\bar{p}$ Collider"
Phys. Rev. Lett. 88 (2002) 042001-1-6
T. Affolder et al. (CDF Collab.)
100. "Study of $B^0 \rightarrow J/\psi K^{(*)0} \pi^+ \pi^-$ decays with the Collider Detector at Fermilab"
Phys. Rev. Lett. 88 (2002) 071801-1-6
T. Affolder et al. (CDF Collab.)
101. "Search for new heavy particles in the $W Z^0$ final state in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"
Phys. Rev. Lett. 88 (2002) 071806-1-6
T. Affolder et al. (CDF Collab.)
102. "Diffractive dijet production at $\sqrt{s} = 630$ and 1800 GeV at the Fermilab Tevatron"
Phys. Rev. Lett. 88 (2002) 151802-1-6
D. Acosta et al. (CDF Collab.)
103. " Υ production and polarization in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"
Phys. Rev. Lett. 88 (2002) 161802-1-6
D. Acosta et al. (CDF Collab.)
104. "Search for new physics in photon-lepton events in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"
Phys. Rev. Lett. 89 (2002) 041802-1-7
D. Acosta et al. (CDF Collab.)
105. "Limits on extra dimensions and new particle production in the exclusive photon and missing energy signature in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"
Phys. Rev. Lett. 89 (2002) 281801-1-7
D. Acosta et al. (CDF Collab.)
106. "Measurement of the B^+ total cross section and B^+ differential cross section $d\sigma/dp_T$ in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"
Phys. Rev. D65 (2002) 052005-1-10
D. Acosta et al. (CDF Collab.)
107. "Searches for new physics in events with a photon and b -quark jet at CDF"
Phys. Rev. D65 (2002) 052006-1-22
T. Affolder et al. (CDF Collab.)
108. "Study of the heavy flavor content of jets produced in association with W bosons in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"

- Phys. Rev. D65 (2002) 052007-1-26
D. Acosta et al. (CDF Collab.)
109. "Soft and hard interactions in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1800$ and 630 GeV"
Phys. Rev. D65 (2002) 072005-1-12
D. Acosta et al. (CDF Collab.)
110. "Search for single-top-quark production in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"
Phys. Rev. D65 (2002) 091102-1-6
D. Acosta et al. (CDF Collab.)
111. "Charged jet evolution and the underlying event in proton-antiproton collisions at 1.8 TeV"
Phys. Rev. D65 (2002) 092002-1-22
T. Affolder et al. (CDF Collab.)
112. "Measurement of B -meson lifetimes using fully reconstructed B decays produced in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"
Phys. Rev. D65 (2002) 092009-1-7
D. Acosta et al. (CDF Collab.)
113. "Search for the decay $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^- \phi$ in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"
Phys. Rev. D65 (2002) 111101-1-6
D. Acosta et al. (CDF Collab.)
114. "Comparison of the isolated direct photon cross sections in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV and $\sqrt{s} = 0.63$ TeV"
Phys. Rev. D65 (2002) 112003-1-10
D. Acosta et al. (CDF Collab.)
115. "Search for new physics in photon-lepton events in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"
Phys. Rev. D66 (2002) 012004-1-27
D. Acosta et al. (CDF Collab.)
116. "Measurement of the ratio of b quark production cross sections in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 630$ GeV and $\sqrt{s} = 1800$ GeV"
Phys. Rev. D66 (2002) 032002-1-8
D. Acosta et al. (CDF Collab.)
117. "Branching ratio measurements of exclusive B^+ decays to charmonium with the Collider Detector at Fermilab"
Phys. Rev. D66 (2002) 052005-1-7
D. Acosta et al. (CDF Collab.)
118. "Cross section for forward J/ψ production in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"

- Phys. Rev. D66 (2002) 092001-1-11
D. Acosta et al. (CDF Collab.)
119. "Search for radiative b -hadron decays in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV"
Phys. Rev. D66 (2002) 112002-1-19
D. Acosta et al. (CDF Collab.)
120. "The CDF plug upgrade electromagnetic calorimeter: test beam results"
Nucl. Inst. Meth. A480 (2002) 524-546
M. Albrow, S. Aota, T. Asakawa, Y. Fukui, T. Handa, K. Hatakeyama, H. Ikeda,
J. Iwai, T. Kikuchi, S.H. Kim, H. Minato, H. Nakada, Y. Seiya et al.
121. "Intercalibration of the longitudinal segments of a calorimeter system"
Nucl. Inst. Meth. A487 (2002) 381-395 M. Albrow, S. Aota, T. Asakawa, Y. Fukui,
T. Handa, K. Hatakeyama, H. Ikeda, J. Iwai, T. Kikuchi, S.H. Kim, H. Minato, H.
Nakada, Y. Seiya et al.
122. "A radiation damage test for double-sided silicon strip detectors"
Nucl. Inst. Meth. A489 (2002) 114-120
Y. Iwata, T. Ohsugi, M. Ikeda, H. Kitabayashi, T. Ohmoto, T. Kondo, Y. Unno, S.
Terada, T. Kohriki, R. Takashima
123. "The CDF-II time-of-flight detector"
Nucl. Inst. Meth. A494 (2002) 416-423
S. Cabrera, H. Kaneko, A. Kazama, S. Kim, K. Sato, K. Sato, F. Ukegawa et al.
124. "Search for a W' boson decaying to a top and bottom quark pair in 1.8 TeV $p\bar{p}$ collisions"
Phys. Rev. Lett. 90 (2003) 081802-1-6
D. Acosta et al. (CDF Collab.)

Conference Talk

1. "Dijet Results from CDF and D0"
Proc. of the XIII Topical Conference on Hadron Collider Physics (Mumbai, India, January 1999)
T. Asakawa
2. "Technicolor Limits at the Tevatron"
Proc. of the XIII Topical Conference on Hadron Collider Physics (Mumbai, India, January 1999)
T. Handa
3. "Rapidity Gap Results from Tevatron"
Proc. of the XIII Topical Conference on Hadron Collider Physics (Mumbai, India, January 1999)
K. Terashi
4. "Top Quark Physics at the Tevatron"
Proc. of Int. Workshop on Linear Colliders (Sitges, Spain, April 1999)
S. Kim
5. "Consumer-Server/Logger system for the CDF experiment"
Proc. of the 11th IEEE NPSS Real Time Conference; (Santa Fe, New Mexico, USA, June 1999)
M. Shimojima
6. "Online monitoring in the upcoming Fermilab Tevatron Run II"
Proc. of the 11th IEEE NPSS Real Time Conference (Santa Fe, New Mexico, USA, June 1999)
M. Shimojima
7. "Spectroscopy and Lifetimes of Bottom and Charm Hadrons"
Proc. of the Third Int. Conference on B Physics and CP Violation (Taipei, Taiwan, December 1999)
F. Ukegawa
8. "CDF: Run II Physics Projections"
Proc. of Int. Conference on B-Physics at Hadron Machines (Sea of Galilee, Kibbutz Maagan, Israel, September 2000)
M. Tanaka
9. "Physics at Tevatron Run II"
Proc. of Physics at Linear Colliders (KEK, Japan, March 2001)
M. Shimojima

10. "CDF Run II Run Control and Online Monitor"
Proc. of Computing in high energy and nuclear physics (Beijing, China, September 2001)
T. Arisawa
11. "QCD Results from CDF"
Proc. of Current and Future Directions at RHIC (BNL, Upton, NY, USA, August 2002)
F. Ukegawa
12. "Present Status of Tevatron Physics & Prospect with Higher Luminosity"
Proc. of Int. Workshop: Recent Progress in Induction Accelerators (RPIA2002) (Tsukuba, October 2002)
K. Yamamoto
13. "Status and Prospects on Top Physics at CDF"
Proc. of APPI 2003: Accelerator and Particle Physics Institute (Iwate, Japan, February 2003)
Y. Takeuchi

Ph.D. Thesis

1. M. Okabe, Univ. of Tsukuba (1998)
“Measurement of the Strong Coupling Constant from Two Jet Production Cross Section in 1.8-TeV Proton-Antiproton Collisions”
2. J. Suzuki, Univ. of Tsukuba (1998)
“Observation of B_c Meson in 1.8-TeV Proton-Antiproton Collisions”
3. H. Ikeda, Univ. of Tsukuba (1999)
“Observation of Diffractive Bottom Quark Production in 1.8-TeV Proton-Antiproton Collisions”
4. H. Minato, Univ. of Tsukuba (1999)
“Measurement of the W Boson Transverse Momentum Distribution in 1.8-TeV Proton-Antiproton Collisions”
5. T. Handa, Hiroshima Univ. (1999)
“Search for Technicolor Particles in 1.8-TeV Proton-Antiproton Collisions”
6. T. Kikuchi, Univ. of Tsukuba (1999)
“Search for Single Top Quark Production in 1.8-TeV Proton-Antiproton Collisions”
7. K. Terashi, Univ. of Tsukuba (2000)
“Observation of Dijet Production by Double Pomeron Exchange in 1.8-TeV Proton-Antiproton Collisions”
8. H. Nakada, Univ. of Tsukuba (2001)
“Measurement of the Diffractive Structure Function of the Antiproton in 1.8-TeV Proton-Antiproton Collisions”
9. M. Tanaka, Univ. of Tsukuba (2001)
“Search for Radiative B -Hadron Decays with the Collider Detector at Fermilab”
10. K. Kurino, Hiroshima Univ. (2002)
“Measurement of the Cross Section and Heavy Quark Composition of $\gamma + \mu$ Events Produced in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV”
11. Y. Miyazaki, Osaka City Univ. (2002)
“Search for Scalar Top Quark Pair-Production by R -Parity Violating Decay Mode in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV”