

II. 素粒子実験グループ

教授 近藤都登、滝川紘治
 助教授 金信弘、宮下茂幸
 講師 中野逸夫、原和彦、安岡聖
 助手 清矢良浩
 準研究員 猪野隆
 大学院生 35名

【1】陽子・反陽子衝突実験

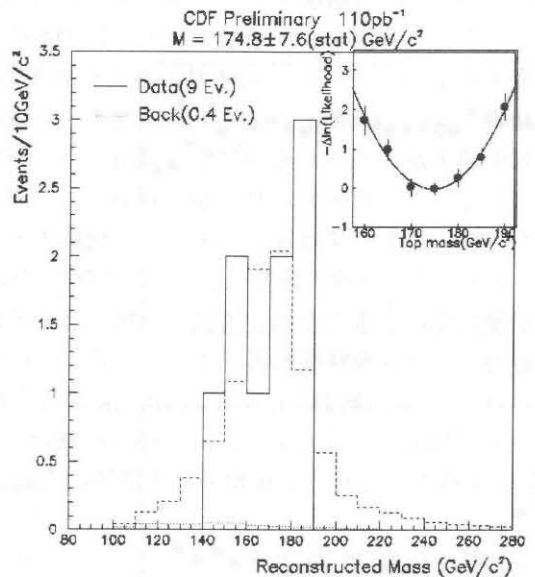
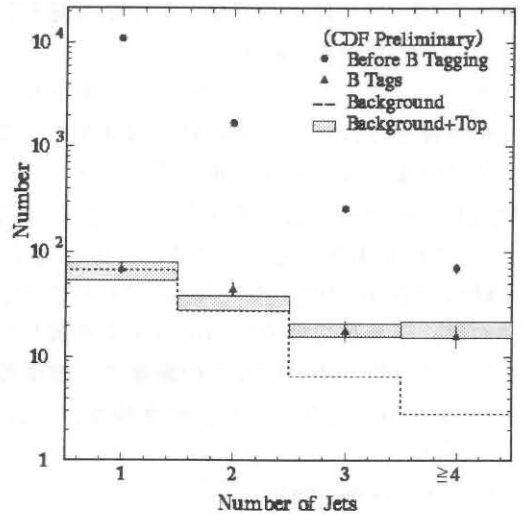
米国フェルミ国立加速器研究所のTEVATRON衝突器を用いた陽子・反陽子衝突によるCDF (Collider Detector at Fermilab) 実験を継続して行った。1988～1989年、1992～1993年5月、1994～1996年2月までの3回の長期実験で収集されたデータは積分ルミノシティ 110 pb^{-1} に達した。トップクォークの生成の観測に関する論文を1995年3月に 67 pb^{-1} の段階で発表し、現在 110 pb^{-1} のデータの解析結果が得られつつある。

(1) トップクォークの観測

素粒子の標準模型に不可欠なトップクォークの存在について、1994年5月にCDFグループが、その「証拠」として発表した後、データ量を蓄積することで、1995年3月に「観測」として論文発表した。更に、1996年2月には 110 pb^{-1} のデータの解析を行って、トップクォークの物理の結果を新しく得た。

重心系エネルギー1.8 TeVの陽子・反陽子衝突では、トップクォークは強い相互作用で対生成 ($t\bar{t}$) される。それぞれは弱い相互作用でWボゾンとbクォークに崩壊し、Wボゾンはさらにクォーク対かニュートリノを含むレプトン対に崩壊する。ここでクォークはジェットとして観測されるので、トップクォークの生成は以下の3つの崩壊モードで計測した。(a) 2つのレプトンを含む、 $t\bar{t} \rightarrow ee/\mu\mu/e\mu + \text{jets}$ 事象 (b) レプトンを1つ含む、 $t\bar{t} \rightarrow e/\mu + \text{jets}$ 事象 (c) レプトンを含まない、 $t\bar{t} \rightarrow \text{multijets}$ 事象。(a) と (b) のモードにおいては、Wの崩壊に伴うレプトンの横運動量 P_T (ニュートリノは消失横運動量としてみる) が $20 \text{ GeV}/c$ 以上の大きな値を持つことを要求する。また (b) と (c) のモードにおいては、ジェットの内、少なくとも1つはbクォークによるジェットであること (bタグ) を要求する。これで、W+jets直接生成によるバックグラウンドを抑えることができる。シリコン飛跡検出器を用いて、bハドロン崩壊点を再構成し、生成点からのずれを検出する方法が有効なbタグ法である。

右上図は (b) のモードにおいてWに随伴するジェットの多重度を示すものであるが、●はbタグ前、▲はbタグ後を示す。破線はトップクォークが生成されていない場合の推定値を示し、斜線部はトップクォークが生成されている場合の推定値を示す。ジェットの多重度3以上で有意なトップの信号が観測されている。

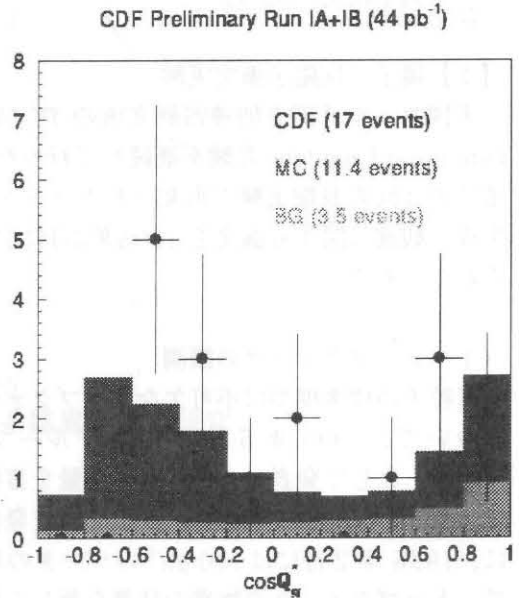


(b) のモードの内、終状態でb タグを含む4 ジェット事象は 34 事象観測された。測定されたレプトンとジェットの運動量からクォークレベルの崩壊素過程を運動学的に再構成し、トップクォークの質量を求めると、 $M_{top} = 176 \pm 6$ (統計誤差) ± 7 (系統誤差) GeV/c^2 が得られた。また終状態で2つのb タグジェットを含む4 ジェット事象は 9 事象観測され、これらよりトップクォークの質量を求めると、 $M_{top} = 175 \pm 8$ (統計誤差) ± 6 (系統誤差) GeV/c^2 が得られた。前頁下図は、再構成された質量分布 (実線) で、モンテカルロによる、 $M_{top} = 175 \text{ GeV}/c^2$ の場合 (破線)、バックグラウンドのみの場合 (点線) と比較している。また、測定されたトップクォーク対生成断面積は $7.5^{+2.3}_{-1.8} \text{ pb}$ で、理論の予想値と 1σ 以内で一致している。

(2) 電弱相互作用

Wボゾンの質量は電弱相互作用を記述する重要なパラメータであり、LEP実験のZボゾンに関する精密測定結果等と総合的に比較することで標準模型の検証ができる。19 pb^{-1} に対するWボゾンの質量測定値を論文発表した。この値は標準模型の予測値と一致している。トップクォークとWボゾンの質量値からヒッグス粒子の質量に対する知見が得られるが、現状では約 1 TeV 以下と制限は緩い。

Wボゾンと光子が同時に生成される断面積の測定を継続した。標準模型ではWと光子の結合は非アーベル理論で予想され、その結果、Wと光子の重心系で、光子のuクォークからの散乱角分布は $\cos \theta_\gamma \sim 0.3$ でゼロとなる (radiation amplitude zero)。これを実測することによってWと光子の結合が非アーベル結合であり、Wがゲージ粒子であることが検証ができるが、右図に示されるようにCDFの光子の散乱角分布はこの傾向を示している。また95%の信頼度で、標準模型からのずれを示す異常結合定数は $-1.8 < \Delta\kappa < 2.0$ と $-0.7 < \lambda < 0.6$ と測定され、標準模型と一致することが示された。



(3) bクォークの物理

$B^0 \bar{B}^0 \rightarrow e\mu X$ の崩壊モードに基づき、 $B^0 \bar{B}^0$ 混合確率の研究を進めた。 B^0 と \bar{B}^0 は弱い相互作用の荷電カレントにより混合し、崩壊レプトン対の電荷の測定から、混合の程度を評価することができる。混合の程度を表すパラメータ χ は小林-益川行列要素に対する実験的な制限を与える。 $e\mu$ 対のモードで測定した結果、 $\chi = 0.130 \pm 0.010$ (統計誤差) ± 0.009 (系統誤差) となった。CDF では $B^0 d$ と $B^0 s$ の両方の中性B中間子が生成されるので、生成比を仮定することで $B^0 d$ と $B^0 s$ のそれぞれの混合確率に対する制限が得られる。この制限と小林-益川行列のユニタリ性条件とから、 $B^0 s$ の混合確率はほぼ最大であることが分かった。この結果は電子・陽電子実験結果と矛盾しない。

bクォークの物理の研究は、TEVATRONのエネルギーでは生成断面積が大きい事、CDFの粒子同定能力が優れている事のため、単独の実験では電子陽電子衝突実験よりも統計精度のよい測定をしている。高性能のシリコン飛跡検出器を用いて、新たに $B^0 s$ 中間子の寿命を崩壊モード $B_s \rightarrow J/\psi \phi$ で測定して $\tau(B_s) = 1.34^{+0.23}_{-0.19}$ (統計) ± 0.05 (系統) ps が得られた。また $B^- u$ と $B^0 d$ 中間子の寿命も $D e X, D^* e X$ の崩壊モードで測定し、 $\tau(B_d) = 1.54 \pm 0.08$ (統計) ± 0.06 (系統) ps、 $\tau(B_u) = 1.56 \pm 0.13$ (統計) ± 0.06 (系統) ps を得た。これら3種類のB中間子の寿命は誤差の範囲で一致する。

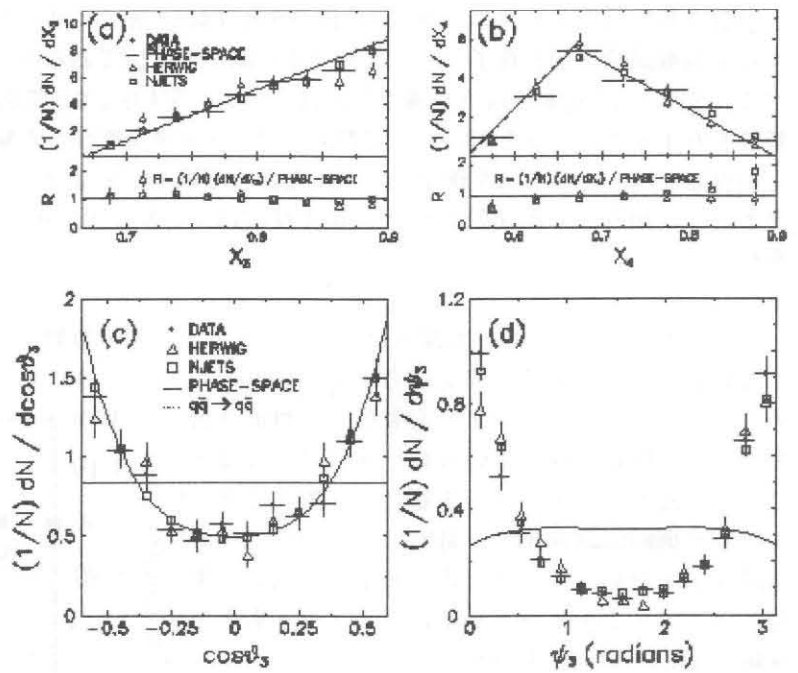
(4) 量子色力学 (QCD)

積算ルミノシティー 19 pb^{-1} での包含ジェット生成断面積の測定結果が得られた。CDFの結果は、ジェットの横エネルギーで $10 \sim 200 \text{ GeV}$ 、また断面積で $10^4 \sim 10^{-3} \text{ nb}/\text{GeV}$ の範囲でQCDの予想断面積と一致している。この結果によって7桁という高い精度でQCDの正しさが立証された。ジェットの横エネルギーで 200 GeV 以上ではCDFの結果はQCDの予想断面積より大きい。これが統計的ゆらぎの効果か、高次のQCD

の効果か、構造関数の誤差によるものか、あるいは標準模型を超える何かによるものかを、今後の実験と理論の両面での研究発展によって明らかにしなければならない。

2~5ジェットを終状態を含む事象の運動学的性質を解析した。終状態の不変質量を $600 \text{ GeV}/c^2$ 以上と要求し、HERWIG と NJETS 2つのQCDの予言と比較した。HERWIGは2パートン→2パートン素過程の断面積を計算し、高次過程はグルーオン輻射として近似されているが、CDFの種々の測定結果をよく再現してきた。NJETSは2→N ($N \leq 5$)の最低次の素過程を計算する。不変質量分布などは、共に良く実験結果を再現することが分かった。

右図はジェットのエネルギー分布と角分布を示し、データ(●)を位相空間モデル(実線)、HERWIG(△)、NJETS(□)と比較している。N=3のデータでNJETSの一致がより良いことが分かる。



(5) 標準模型を超える物理

積算ルミノシティ 70 pb^{-1} のデータで2ジェット終状態事象における2ジェット不変質量分布を精密に測定した。ピークを探すことで2ジェットに崩壊する新粒子を探索した。アキシグルーオンは200から $1000 \text{ GeV}/c^2$ の範囲で、クォーク励起状態は200から $600 \text{ GeV}/c^2$ の範囲で、テクニロー粒子は270から $510 \text{ GeV}/c^2$ の範囲で存在しない(95%の信頼度)ことを示した。

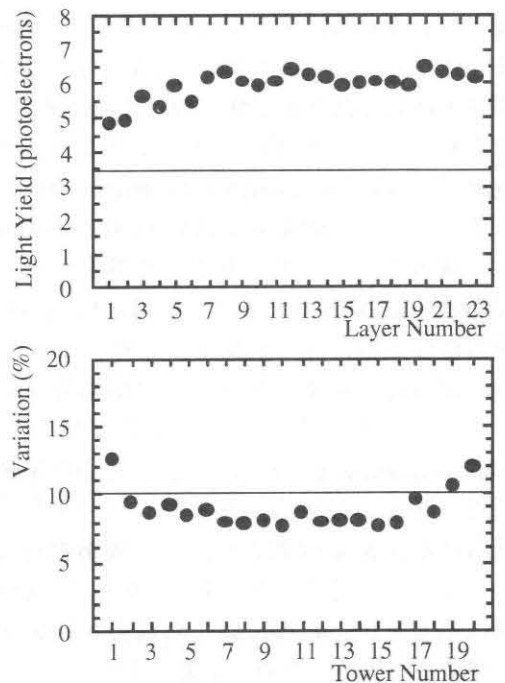
Zボゾンよりも質量の重い中性電弱ボゾンZ'粒子の探索を、レプトン対の不変質量分布の裾を測定することで行った。Z'の結合がZと同じと仮定すると、 $690 \text{ GeV}/c^2$ よりも軽いZ'粒子は無いこと(95%の信頼度)が測定された。

【2】検出器の開発研究

1999年に再開される次回のランRUN IIでは軽いヒッグス粒子や超対称性粒子の探索、BシステムでのCP非保存反応の解明などを行う。ビームの輝度は約10倍になり、衝突間隔も130・400 nsと短くなるため、CDF検出器の改良が進行中である。筑波大学グループは端冠部電磁カロリメータ、衝突点検出用ファイバー飛跡検出器(IFT)の開発・製作を担当している。また、将来のハドロン衝突型実験で用いる電磁カロリメータとしてGSOシンチレータの開発を行った。

(1) タイル/ファイバー型電磁カロリメータの製作

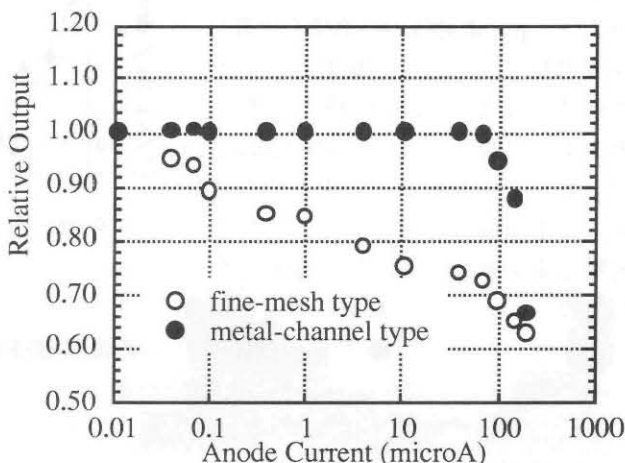
タイル/ファイバー型カロリメータはシンチレータ板(タイル)に溝を掘り、そこに波長変換ファイバーをはめ込んで読みだすサンプリング部と鉛板とを交互に23層重ねた構造をしている。高速応答性、ファイバー読み出しにより不感領域を少なくできることが特長である。感応部であるタイル/ファイバー光学系は端冠部の15度分をユニットとして約1000ユニット



ト全数を製作した。1ユニットは20枚のタイルに分割(タワー分割)されているが、個別の応答を検査する宇宙線試験を殆ど終了した。エネルギー測定単位である同一タワーに含まれるタイルの光量は、すべて、要求の3.5光電子以上を満たし、ばらつきも平均8.4%と要求(10%以下)を満たしている。このような特性を有するユニットを用いて、実際にカロリメータを製作した場合の性能をモンテカルロで評価し、所定の性能が得られることを確認した。検査されたユニットはフェルミ研究所に随時輸送され、カロリメータとしての組み立てが開始された。96年度にはフェルミ研究所でエネルギー較正のためのビームテストを行う。

(2) タイル/ファイバー型端冠プリシャワーカウンターの製作

端冠部領域での光子の同定能力を向上させるため、プリシャワーカウンターの製作し、性能評価を行った。構造は端冠電磁カロリメータとほぼ同じで、電磁カロリメータの1層目に位置するタイル信号を個別に読み出す。個別ファイバーの信号を読み出すための多チャンネル光電子増倍管を開発した。メタルチャンネル型のダイノード構造を採用することで、従来のもの(ファインメッシュ型)よりも量子効率(5割増)、クロストークともに優れ、単光電子を検出できるようになった。アノード電流の変動に対する信号波高の安定性も飛躍的に改善された(右図)。

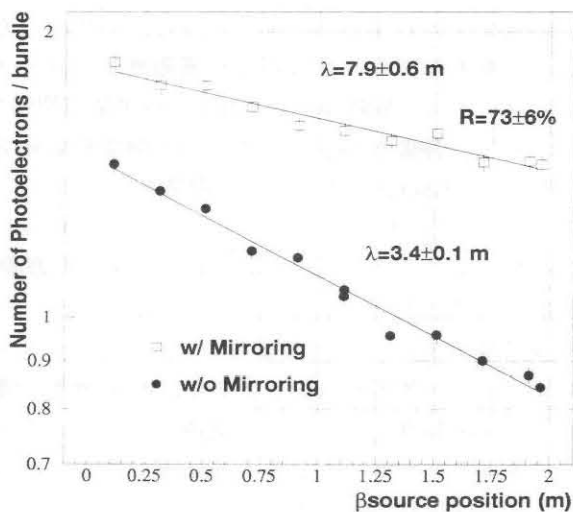


(3) CDF 超前方ファイバー飛跡検出器

陽子・反陽子衝突における前方回折散乱の測定のために、0.8mm角シンチレーションファイバーからなり、多チャンネル光電子増倍管を用いた飛跡検出器を製作した。CDF 検出器に組み込んで衝突点から56m前方で反跳反陽子の運動量測定をした。重心エネルギー0.63 TeVと1.8 TeVでデータを収集した。小さなエネルギー交換反応でのポメロン機構の役割等の解明が期待される。

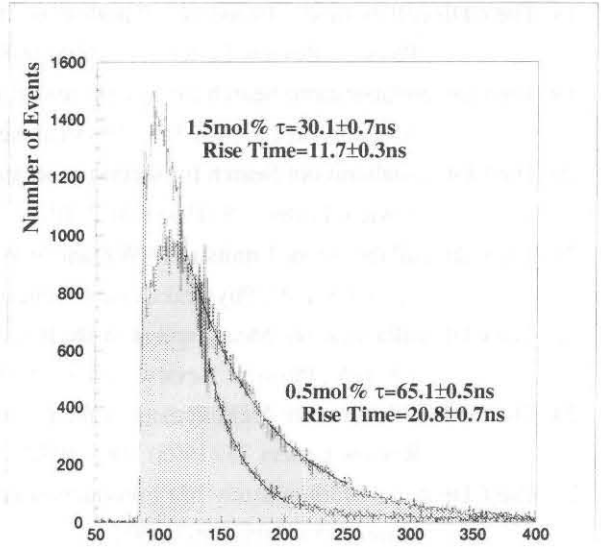
(4) ファイバー飛跡検出器 (IFT) の開発

直径 0.6 mm の3HFシンチレーションファイバーを2層1組(doublet)として円筒状に配置する。ビーム軸と平行な6組、ステレオ角をなすもの6組で構成される。荷電粒子のトリガーおよび飛跡再構成におけるseed 飛跡として使われる。筑波大学ではdoublet製作法の開発、発光量増加のための開発、放射線耐性に関する研究、長期安定性についての研究を行った。これを通じて、ほぼ要求を満たす目処が立ったが余裕のために当初の直径0.5 mmを変更した。光信号の読み出しにはVLPC (visible light photon counter) が使われる。フェルミ研究所ではVLPC特性の測定が開始され、筑波大学ではHe冷却器の整備を行っている段階である。RUN IIIでファイバー飛跡検出器の領域を中央飛跡検出器にまで延長するためには、3 HFファイバーに直接光電素子を取り付け信号処理のできるコンパクトな光読み出し系が必要となる。そのためAPD (avalanche photodiode) のアレイの開発を行い、利得、雑音の温度依存性などのデータを収集した。低温ほどS/Nは改善され、-20度あたりで目標とするS/N=10が達成できる条件のあることが分かった。動作の安定化、実際に則した高速エレクトロニクスの開発が実用化のために必要である。



(5) 高速、高光量、高耐放射線性結晶クリスタルGSOの開発

次世代の加速器実験ではヒッグス粒子の探索が主眼となり、比較的軽い質量 (150 GeV以下) では2光子への崩壊を検知することが最も有望な探索方法である。生成断面積の小さな信号の検出にはエネルギー分解能の優れた全吸収型結晶シンチレータが有効である。10 Mradを超える領域でも動作し、高速かつ光量の多いシンチレータで実用化されているものは無かったが、Ceを付活したGd₂SO₃(GSO)結晶を候補として開発を行った。Ce濃度を1.5%まで上げることで崩壊時間30ns、1 cm²×4 cmのサンプルで光量2500光子/MeVが得られ、極めて優れていることが分かった。1 Gradに達する放射線を受けても透過率の劣化が見られなかったが、一方で、シンチレータ発光機構が変化する可能性があることが分かった。実用上問題があるかどうかの研究を今後継続する。



<論文>

1. The CDF collaboration: Search for the Top Quark decaying to a Charged Higgs Boson in $\bar{p}p$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV, Physical Review Letters 73 (1994) 2667-2671.
2. The CDF collaboration: Measurement of Drell-Yan electron and muon pair differential cross sections in $\bar{p}p$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV, Physical Review D 49 (1994) R1-R6.
3. The CDF collaboration: Evidence for top quark production in $\bar{p}p$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV, Physical Review D 50 (1994) 2966-3026
4. The CDF collaboration: Measurement of the B meson and b quark cross sections at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV using the exclusive decay $B^0 \rightarrow J/\psi K^*$, Physical Review D 50 (1994) 4252-4257.
5. The CDF collaboration: Measurement of small angle antiproton-proton elastic scattering at $\sqrt{s} = 546$ and 1800 GeV, Physical Review D 50 (1994) 5518-5534.
6. The CDF collaboration: Measurement of $\bar{p}p$ single diffraction dissociation at $\sqrt{s} = 546$ and 1800 GeV, Physical Review D 50 (1994) 5535-5549.
7. The CDF collaboration: Measurement of the antiproton-proton total cross section at $\sqrt{s} = 546$ and 1800 GeV, Physical Review D 50 (1994) 5550-5561.
8. The CDF collaboration: Evidence for color coherence in $\bar{p}p$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV, Physical Review D 50 (1994) 5562-5579.
9. The CDF collaboration: Direct Measurement of the W Boson Width, Physical Review Letters 74 (1995) 341-345.
10. The CDF collaboration: Charge Asymmetry in W-Boson Decays Produced in $\bar{p}p$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV, Physical Review Letters 74 (1995) 850-854.
11. The CDF collaboration: Observation of Rapidity Gaps in $\bar{p}p$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV, Physical Review Letters 74 (1995) 855-859.
12. The CDF collaboration: Measurement of W-Photon Couplings in $\bar{p}p$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV, Physical Review Letters 74 (1995) 1936-1940.
13. The CDF collaboration: Limits on Z-Photon Couplings from $\bar{p}p$ Interactions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV, Physical Review Letters 74 (1995) 1941-1945.
14. The CDF collaboration: Observation of Top Quark Production in $\bar{p}p$ Collisions with the Collider Detector at Fermilab, Physical Review Letters 74 (1995) 2626-2631.
15. The CDF collaboration: Search for charged bosons heavier than the W boson in $\bar{p}p$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV,

Physical Review Letters 74 (1995) 2900-2904.

16. The CDF collaboration: Search for new particles decaying to dijets in $\bar{p}p$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV, Physical Review Letters 74 (1995) 4988-4992.
18. The CDF collaboration: Properties of high-mass multijet events at the Fermilab proton-antiproton collider, Physical Review Letters 75 (1995) 608-612.
19. The CDF collaboration: Search for squarks and gluinos via radiative decays of neutralinos in proton-antiproton collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV, Physical Review Letters 75 (1995) 613-617.
20. The CDF collaboration: Search for second generation leptoquarks in $\bar{p}p$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV, Physical Review Letters 75 (1995) 1012-1016.
21. The CDF collaboration: Limits on WWZ and WW γ couplings from WW and WZ production in $\bar{p}p$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV, Physical Review Letters 75 (1995) 1017-1022.
22. The CDF collaboration: Measurement of the B meson differential cross section $d\sigma/dP_T$ in $\bar{p}p$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV, Physical Review Letters 75 (1995) 1451-1455.
23. The CDF collaboration: Measurement of the polarization in the decay $B_d \rightarrow J/\psi K^{*0}$ and $B_s \rightarrow J/\psi \phi$, Physical Review Letters 75 (1995) 3068-3072.
24. The CDF collaboration: Study of $t\bar{t}$ production in $\bar{p}p$ collisions using total transverse energy, Physical Review Letters 75 (1995) 3997-4002.
25. The CDF collaboration: Y production in $\bar{p}p$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV, Physical Review Letters 75 (1995) 4358-4363.
26. The CDF collaboration: Search for new gauge bosons decaying into dielectrons in $\bar{p}p$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV, Physical Review D 51 (1995) R949-953.
27. The CDF collaboration: Kinematic evidence for top quark pair production in W + multijet events in $\bar{p}p$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV, Physical Review D51 (1995) 4623-4637.
28. The CDF collaboration: Identification of top quarks using kinematic variables, Physical Review D52 (1995) R2605-R2609.
29. The CDF collaboration: Measurement of the ratio $\sigma(B(\bar{p}p \rightarrow W \rightarrow \tau \nu)) / \sigma(B(\bar{p}p \rightarrow W \rightarrow e \nu))$ in $\bar{p}p$ collisions at $\sqrt{s} = 1800$ GeV, Physical Review D52 (1995) 2624-2655.
30. S. Kim, "R&D and mass production of a scintillating tile/fiber system for the CDF plug upgrade EM calorimeter", Nucl. Instr. and Meth. A360, 206 (1995).
31. K. Hara et al., "Optics of a large scintillating tiles with wavelength shifting fiber readout - application to a hadron calorimeter", Nucl. Instr. and Meth. A365, 370 (1995).

<学位論文>

1. 満塩尚史, "Measurement of neutral B-meson mixing in electron-muon events in 1.8-TeV proton-antiproton collisions", 物理学研究科博士論文
2. 浅川高史, "Properties of high-mass multijet events at the Fermilab proton-antiproton collider", 物理学研究科博士論文
3. 菊地俊章 "Top Quark Mass and Kinematics in lepton + 4jets channel in $\bar{p}p$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV" 物理学研究科修士論文
4. 大倉正宏 「CDFプラグ・プリシャワーカウンターに用いるシンチレーティングタイル／ファイバー・ユニットの性能評価と品質管理」 理工学研究科修士論文
5. 河本浩 「CDFプラグ電磁カロリメーターに用いるシンチレーティングタイル／ファイバー・ユニットの基礎特性と品質管理」 理工学研究科修士論文
6. 佐野道明 "Development of the CDF Intermediate Scintillating Fiber Tracker", 理工学研究科修士論文
7. 田中 芳和 「CDF エンドプラグ部プリシャワーカウンター用多チャンネル光電子増倍管の性能評価」 理工学研究科修士論文

<講演>

1. 近藤都登「コンテンポラリーフィジックストップクォークの発見」日本物理学会（特別講演）、神奈川県（平成7年4月）
2. 河本浩「CDFエンドプラグ部電磁カロリメータに用いるタイル／ファイバーユニットの研究開発」日本物理学会、神奈川県（平成7年4月）
3. 原和彦「SDCカロリメータに用シチレーティングタイル／ファイバー系光学特性のビームテスト」日本物理学会、神奈川県（平成7年4月）
4. 佐野道明「CDF検出器中央部のファイバー飛跡検出器の研究開発」日本物理学会、神奈川県（平成7年4月）
5. 植村暢之「重心系エネルギー1.8 TeV 陽子・反陽子衝突における WW 事象の研究」日本物理学会、神奈川県（平成7年4月）
6. 下島真「重心系 1.8 TeV 陽子反陽子衝突における $W\gamma$ 事象の研究」日本物理学会、神奈川県（平成7年4月）
7. 大石竜太郎「重心1.8 TeV 陽子・反陽子衝突における $\gamma + D^*$ 生成断面積の測定」日本物理学会、神奈川県（平成7年4月）
8. 満塩尚史「重心1.8 TeV 陽子・反陽子衝突における $B\bar{B}$ mixing の研究」日本物理学会、神奈川県（平成7年4月）
9. 滝川紘治「CDFでのトップクォーク生成の観測」日本物理学会、神奈川県（平成7年4月）
10. 林英一郎「A Search for $Z' \rightarrow 11$ in pp collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV」APS meeting, Washington D.C.（平成7年4月）
11. 佐藤博之「 $W\gamma$ and $Z\gamma$ diboson production at CDF」APS meeting, Washington D.C.（平成7年4月）
12. 近藤都登「Observation of top quark at Tevatron」「Search for new physics in CDF」Summer School at International Center for Theoretical Physics, Trieste, Italy（平成7年7月）
13. 菊池俊章「CDF検出器中央部のファイバー飛跡検出器の研究開発」日本物理学会、中部大学（平成7年10月）
14. 田中芳和「CDFエンドプラグ部プリシャワーカウンター用多チャンネル光電子増倍管の性能評価」日本物理学会、中部大学（平成7年10月）
15. 大倉正宏「CDFプリシャワーカウンターのテスト」日本物理学会、中部大学（平成7年10月）
16. 横山雅彦「CDFにおけるシリコンバックス検出器を用いた τ 粒子同定」日本物理学会、中部大学（平成7年10月）
17. 下島真「Radiation Amplitude Zero in $W\gamma$ events at CDF」日本物理学会、中部大学（平成7年10月）
18. 金子智洋「CDFにおけるBose-Einstein Correlation の研究」日本物理学会、中部大学（平成7年10月）
19. 原和彦「最近のCDFの結果—トップクォークの物理とジェット生成断面積」京都大学理学部（平成8年3月）
20. 清矢良浩「最近のCDFの結果」日本大学理工学部（平成8年3月）
21. 近藤都登「最近のCDFの結果—トップクォークの物理とジェット生成断面積」東京大学原子核研究所（平成8年3月）