

## II. 素粒子実験グループ

教授 近藤 都登, 滝川 紘治, 金 信弘  
 助教授 宮下 茂幸  
 講師 安岡 聖, 原 和彦, 清矢 良浩  
 準研究員 浅川 高史, 大石 竜太郎  
 大学院生 28 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テバトロン加速器を用いて重心系エネルギー $\sqrt{s} = 1.8 \text{ TeV}$ の陽子・反陽子衝突実験が行われた。我々はCDF(Collider Detector at Fermilab)検出器を用いて、1988~1989年、1992~1993年5月、1994~1996年2月まで3回の長期実験で積分ルミノシティ $110 \text{ pb}^{-1}$ のデータを収集した。そのデータの解析から、相互作用や基本粒子の性質等の研究により様々な成果を上げた。

#### (1) トップクォークの物理

トップクォークの観測について、 $110 \text{ pb}^{-1}$ のデータから解析方法の向上等により精度の良い結果が得られ、新たにトップクォークの質量 $m_t = 176.8 \pm 4.4$  (統計誤差)  $\pm 4.8$  (系統誤差)  $\text{ GeV}/c^2$ 、生成断面積 $\sigma(t\bar{t}) = 7.7_{-1.5}^{+1.8} \text{ pb}$ を測定した。また1つのレプトンを含むトップクォーク対生成事象を再構成しその運動学的性質を研究した。図1は再構成されたトップクォーク対の横向き運動量 $P_T(t\bar{t})$  (陽子反陽子衝突軸に対して垂直な運動量成分)の分布、図2はトップクォーク対間の方位角分布である。いずれも量子色力学(QCD)で期待される分布と一致する結果が得られた。ボトムクォークジェットを1つ以上要求した候補事象を用いて、ボトムジェット以外の2ジェット系不変質量分布を観測した(図3)。このことからトップクォーク対生成事象の中に $W \rightarrow q\bar{q}'$ の信号が2ジェットとして存在していることを初めて確認した。

#### (2) 電弱相互作用の物理

光子を伴ったWボソン事象を用いて非アーベル理論で予想される $WW\gamma$ 結合の研究を行った。標準理論では、 $WW\gamma$ 結合により光子の生成確率分布は $\cos\theta_\gamma \sim 0.3$ でゼロになることが期待されている。ここで $\theta_\gamma$ は、 $W\gamma$ 重心系において始状態クォークから計った光子の散乱角である。図4は $110 \text{ pb}^{-1}$ のデータを用いた $\cos\theta_\gamma$ 分布である。観測結果は標準理論を支持する傾向にある。また $W\gamma$ 事象生成断面積の測定から $WW\gamma$ 結合の強さを研究している。さらに $WW\gamma$ 、 $WWZ$ 結合の研究のために、 $W^+W^-$ 対生成事象の証拠とその生成断面積 $\sigma(W^+W^-) = 10.2_{-5.1}^{+6.3}$  (統計誤差)  $\pm 1.6$  (系統誤差)  $\text{ pb}$ を測定した。この結果は標準理論の期待値と一致している。

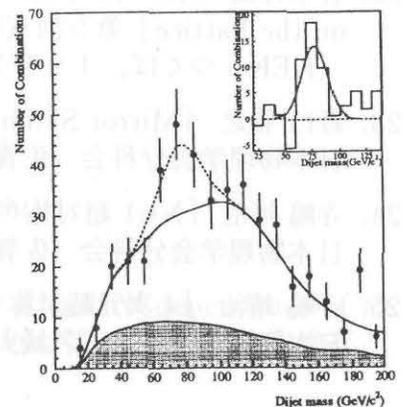
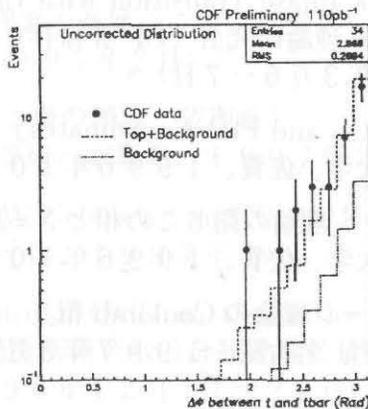
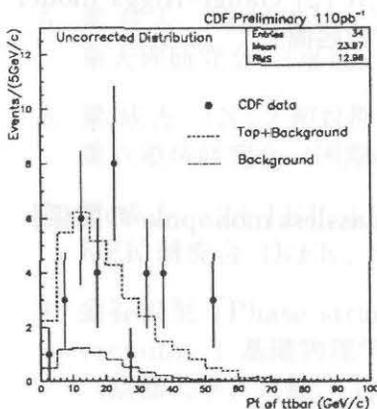


図 1: 再構成されたトップクォーク対の横運動量分布。

図 2: 再構成されたトップクォーク対の方位角分布。

図 3: 再構成されたトップクォーク対事象中の2ジェット系不変質量分布。

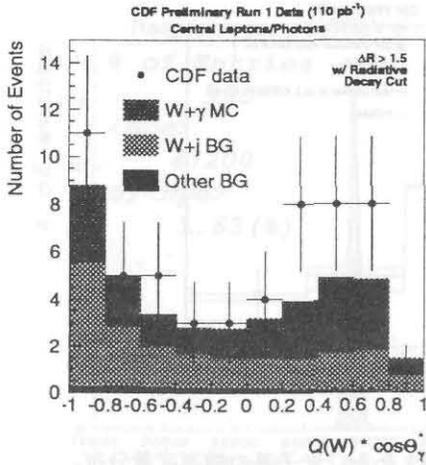


図 4:  $W\gamma$ 候補事象の光子生成角分布 ( $\cos\theta_\gamma$ )。

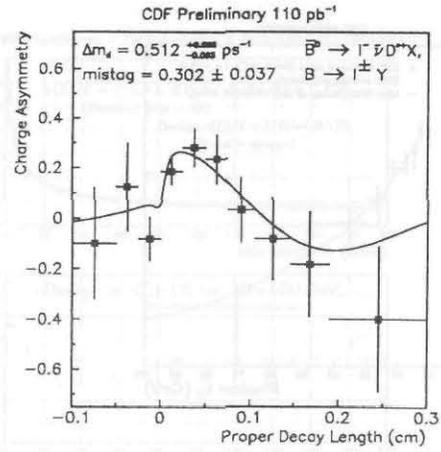


図 5: 観測された $B^0\bar{B}^0$ 混合の時間依存性。

### (3) ボトムクォークの物理

B メソン崩壊について測定精度の良い研究が継続的に行なわれた。その結果の1例としてB メソンの寿命測定結果を示す。荷電B メソンと中性B メソンの寿命比について、 $B \rightarrow \psi + K$ 再構成から  $\tau(B^-)/\tau(B^0) = 1.06 \pm 0.07$ (統計誤差)  $\pm 0.01$ (系統誤差),  $B \rightarrow l(e \text{ or } \mu) + D^* + X$ 再構成から  $\tau(B^-)/\tau(B^0) = 1.11 \pm 0.06$ (統計誤差)  $\pm 0.03$ (系統誤差)を得た。また $B^0\bar{B}^0$ 混合の研究が進められた。2つのレプトン(電子またはミュー粒子)と荷電D メソン事象を用いて $B^0\bar{B}^0$ 混合を観測した。 $B^0\bar{B}^0$ が対生成されていると仮定して、崩壊したB メソンのフレーバーを1つのレプトンとD メソンの電荷( $B^0 \rightarrow l^+ D^{*-} + X$ )から、生成時のB メソンのフレーバーをもう1つのB メソンが崩壊したレプトンの電荷( $\bar{B}^0 \rightarrow l^- + X$ )から予想した。混合の時間依存性 $QQ(t)$ は信号事象のみの場合、

$$QQ(t) = \frac{\text{unmix} - \text{mix}}{\text{unmix} + \text{mix}} = \cos \Delta m_d t,$$

と書ける。ここで unmix は生成時と同じフレーバーで観測されたB メソンの数, mix は混合によってフレーバーが変わって観測されたB メソンの数である。図5に観測された混合の時間依存性 $QQ(t)$ を示す。フレーバーを間違えて予想する確率と崩壊点の位置分解能を考慮して混合振動数  $\Delta m_d = 0.512 \pm 0.093$ (統計誤差)  $^{+0.031}_{-0.038}$ (系統誤差) psecを得た。いまだ存在が確認されていないチャームフレーバーをもつB メソンの探査が  $B_c \rightarrow \psi + l(e \text{ or } \mu) + X$  の崩壊過程を用いて進められている。

### (4) 強い相互作用の物理

ジェット生成過程, 光子生成過程, ウィークボソン生成過程, 超前方回折散乱過程を用いて強い相互作用(QCD)の研究を行った。包括ジェット生成断面積の観測を昨年度から統計量を増やして継続的に行い, ジェット $P_T \sim 200$  GeV以上領域で観測値が2次の摂動まで考慮したQCD予測値(NLO)よりも有意に大きい結果が得られた。この傾向は2ジェット生成断面積, 多重ジェット生成断面積においても観測されている。現在これらの観測結果のより詳しい考察を行なっている。光子生成過程の研究では, 包括一光子過程と二光子過程に注目しその生成断面積と運動学的性質を観測した。包括一光子過程においては光子の測定領域を, 擬ラビディティ( $\eta$ )で $|\eta| < 1$ から $|\eta| < 2$ に増加し, その生成断面積の $\eta$ 依存性を $4\text{pb}^{-1}$ のデータを用いて測定した。比較的大きな $P_T$ 領域( $P_T > 23$  GeV)でNLOと一致した。二光子過程では, 光子の測定領域 $|\eta| < 1$ で $110\text{pb}^{-1}$ のデータを用いてその生成断面積と運動学的性質を調べた。図6は二光子生成断面積, 図7は二光子系の $P_T$ 分布( $k_T$ )を示す。生成断面積の観測結果はNLOと一致するが,  $k_T$ 分布はNLOよりむしろ一次摂動とパートンシャワーを用いた予測分布と一致している。この傾向は一光子+ジェット生成過程でも観測されている。またウィークボソンを用いて同じ様な研究が行なわれ, 統括的に生成過程のより詳しい解析及び考察が行なわれている。超前方回折過程の研究では, 前回の実験後半に設置したファイバー飛跡検出器を用いて収集したデータからジェット生成事象や重いクォーク生成事象を解析し, その生成メカニズムを解明している。

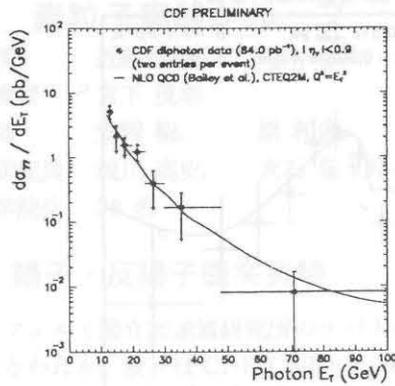


図 6: 測定された二光子生成断面積。

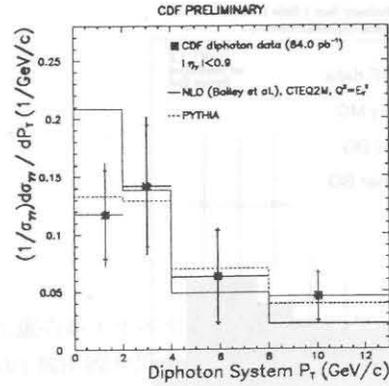


図 7: 観測された二光子系の横運動量分布。

## 【2】検出器の研究開発

1999年より始まるCDF実験(RUN II)では、加速器の増強によりビーム輝度が10倍に、また粒子の衝突間隔も130 - 400 ns程度に短くなる。これに伴い検出器に対しより高い耐放射線性、より速い応答性が要求され、検出器各部の増強が行なわれている。筑波大グループは端冠部タイル/ファイバー型電磁カロリメータ、同プリシャワーカウンター、及びシリコン飛跡検出器(ISL)の開発・製作を担当している。端冠部電磁カロリメータ及びプリシャワーカウンターの製作・品質検査は1996年6月までに終了した。フェルミ研究所では1996年12月より $e/\pi$ ビームを用いたカロリメータ及びプリシャワーカウンターの最終テストを行っている。またプリシャワーカウンターの信号読み出しに用いられる多チャンネル光電子増倍管の性能評価を行った。ヒッグス粒子の探索が主眼である次世代の高エネルギー衝突型加速器実験で用いられるカロリメータとして、GSO/PWOシンチレータおよびシンチレーティングタイル/ファイバー型カロリメ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及びプリシャワーカウンターの製作

タイル/ファイバー型電磁カロリメータは、シンチレータ板(タイル)に信号読み出し用波長変換ファイバーをはめ込んだサンプリング部と鉛板を交互に23層重ねた構造をしている。衝突点に近い第一層目は、特に光子の同定能力を向上させるためにプリシャワーカウンターとして用いられ、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。検出体であるタイル/ファイバー部はビーム軸に垂直な面で $15^\circ$ ずつに分割されており、これをひとつのユニットとしている。ひとつのユニットは20枚のタイル/ファイバー系から成る。全てのユニット(1144枚)について宇宙線( $\mu$ 粒子)に対する応答を測定した。得られた応答分布とシャワーモンテカルロを用いて、製作したカロリメータ及びプリシャワーカウンターの性能を評価した。図8は100 GeVのエネルギーを持った電子に対して期待されるカロリメータの応答分布である。期待されるエネルギー分解能は1.63%となり、要求値1.89%を満たしていることがわかった。また図9はフェルミ研究所におけるビームテストで得られたエネルギー分解能カーブ(破線:測定値,実線:要求値)でありこれまでのところ、所定の性能が得られている。ビームテストは1997年秋頃まで継続される予定である。

### (2) 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

プリシャワーカウンターからの信号はタイル/ファイバー系ごと個別に多チャンネル光電子増倍管を用いて読み出される。量子効率、アノード電流の変動に対するゲインの安定性、チャンネル間のクロストーク等の測定結果から、我々はメタルチャンネル型ダイノードを持ち等比電圧供給型の構造を持った光電子増倍管(浜松 R5900+リニアベース)を採用した。また22本の試験用光電子増倍管を用いて性能評価を行った。図10は光電子増倍管の量子効率の分布である。全ての光電子増倍管は量子効率に対する我々の要求値5%を満たした。

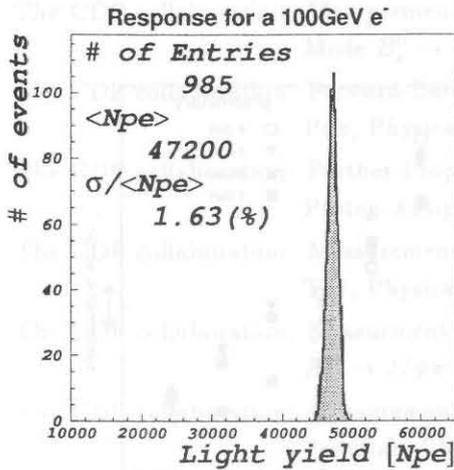


図 8: 100 GeV 電子に対して予想されるカロリメータの応答分布。

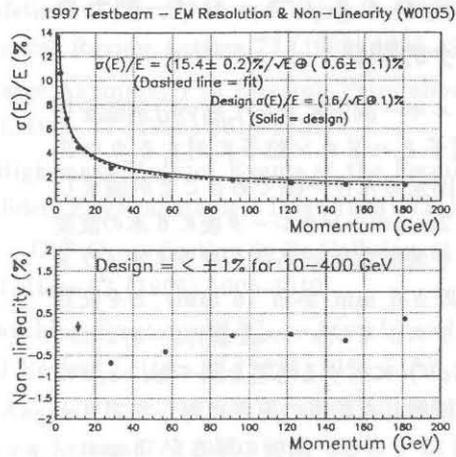


図 9: ビームテストで得られたエネルギー分解能分布。

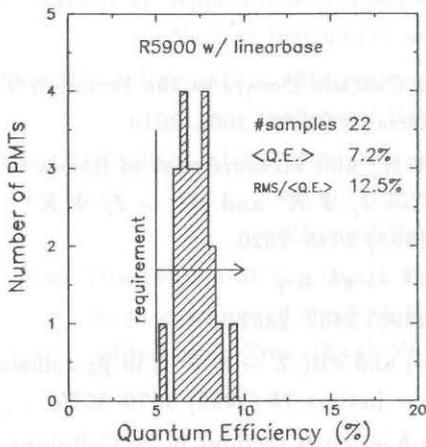


図 10: テスト用 PMT のゲインのばらつき。

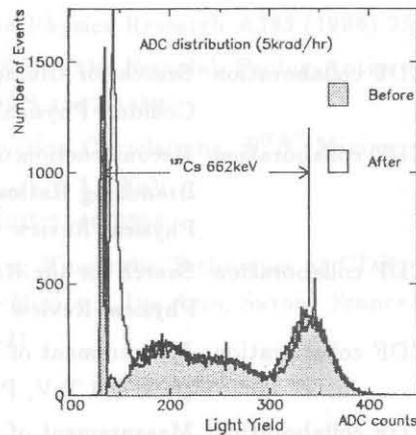


図 11: 放射線照射前後の GSO の光量分布。

### (3) シリコン飛跡検出器の開発

シリコンセンサーのテスト用サンプルを使い、基礎特性（電圧-電流カーブ、電圧-容量カーブ等）を調べた。また  $^{90}\text{Sr}$  からの  $\beta$  線に対するセンサーの応答を測定した。

### (4) 高分解能、高耐放射線性 GSO/PWO クリスタルを用いたカロリメータの開発

これまでに  $\text{Gd}_2\text{SO}_2$  (GSO) に Ce 1.5 mol% 付活した結晶が十分に短い発光時間と十分な発光量を持つこと、さらに放射線耐性として 1 Grad までの  $\gamma$  線照射に対して透過率が劣化しないこと等がわかっている。引き続き  $10 \times 10 \times 40 \text{ mm}^3$  の GSO サンプルを用いて、放射線照射 (5 krad/h) による発光量への影響を調べた。図 11 に放射線照射前と照射直後の  $^{137}\text{Cs}$  からの  $\gamma$  線に対する GSO の発光量分布を示す。この測定ではベDESTAL がわずかに ( $\sim 50 \text{ MeV}$  相当) 増加している。一方ゲインの変化はほとんど見られない。今後継続して発光機構および実用上の問題について研究していく。

## (5) 高分解能タイル / ファイバー型カロリメータの開発

ジェットのエネルギー測定において高い分解能を得るためには、電子とハドロン粒子に対するカロリメータの応答が出来るだけ一様であることが望ましい。1m×1m×2mmのシンチレータ板に6本の波長変換ファイバーを等間隔にはめ込んだタイル / ファイバーと鉛板 (厚さ6 mm から 16 mm) とを交互に105層重ねたテストモジュールを製作、 $e/\pi$ ビーム (1, 2, 3, 4 GeV) に対する応答を調べた。 $e/\pi$ に対する応答比を積層した鉛板の厚さに対してプロットしたものが図12である。鉛板の厚さを8 mm - 10 mm 程度にしたとき、応答比が1程度となり最も適していることがわかる。

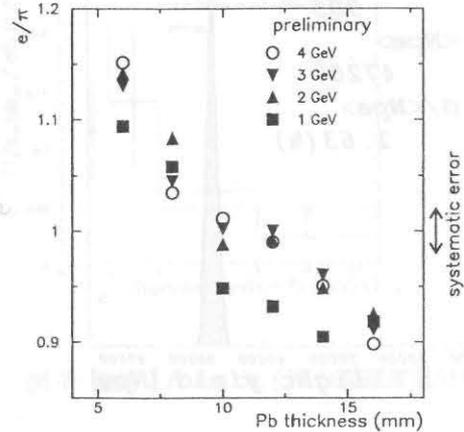


図 12: 鉛の厚さに対する  $e/\pi$  比。

## (論文)

1. The CDF collaboration: Search for Gluino and Squark Cascade Decays at the Fermilab Tevatron Collider, Physical Review Letters 76 (1996) 2006-2010.
2. The CDF collaboration: Reconstruction of  $B^0 \rightarrow J/\Psi K_s^0$  and Measurement of Ratios of Branching Ratios involving  $B \rightarrow J/\Psi K^*$  and  $B^+ \rightarrow J/\Psi K^+$ , Physical Review Letters 76 (1996) 2015-2020.
3. The CDF collaboration: Search for the Rare Decay  $W^\pm \rightarrow \pi^\pm + \gamma$  Physical Review Letters 76 (1996) 2852-2857.
4. The CDF collaboration: Measurement of  $\sigma_B(W \rightarrow e\nu)$  and  $\sigma_B(Z \rightarrow e^+e^-)$  in  $\bar{p}p$  collisions at  $\sqrt{s} = 1.8$  TeV, Physical Review Letters 76 (1996) 3070-3075.
5. The CDF collaboration: Measurement of Correlated  $\mu\bar{b}$  jet cross sections in  $\bar{p}p$  Collisions at  $\sqrt{s} = 1.8$  TeV, Physical Review D53 (1996) 1051-1065.
6. The CDF collaboration: Measurement of the Mass of the  $B_s^0$  Meson, Physical Review D53 (1996) 3496-3505.
7. S. Geer and T. Asakawa: The Analysis of Multijet Events at High-Energy Hadron Colliders, Physical Review D53 (1996) 4793-4805.
8. The CDF collaboration: Search for Chargino-Neutralino Production in  $\bar{p}p$  Collisions at  $\sqrt{s} = 1.8$  TeV, Physical Review Letters 76 (1996) 4307-4311
9. The CDF collaboration: Measurement of the  $B^-$  and  $\bar{B}^0$  Meson Lifetimes Using Semileptonic Decays, Physical Review Letters 76 (1996) 4462-4467
10. The CDF collaboration: Search for Flavor-Changing Neutral Current B Meson Decays in  $\bar{p}p$  Collision at  $\sqrt{s} = 1.8$  TeV, Physical Review Letters 76 (1996) 4675-4680
11. The CDF collaboration: Search for Charged Higgs Boson Decays of the Top Quark using Hadronic  $\tau$  Decays, Physical Review D54 (1996) 735-742
12. The CDF collaboration: Inclusive Jet Cross Section in  $\bar{p}p$  Collisions at  $\sqrt{s} = 1.8$  TeV, Physical Review Letters 77 (1996) 438-443
13. The CDF collaboration: Properties of Jets in Z Boson Events from 1.8 TeV  $\bar{p}p$  Collisions, Physical Review Letters 77 (1996) 448-453
14. The CDF collaboration: Measurement of the  $\Lambda_b^0$  Lifetime Using  $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+ l^- \bar{\nu}$ , Physical Review Letters 77 (1996) 1439-1443

15. The CDF collaboration: Measurement of the Lifetime of the  $B_s^0$  Meson Using the Exclusive Decay Mode  $B_s^0 \rightarrow J/\Psi\phi$ , Physical Review Letters 77 (1996) 1945-1949
16. The CDF collaboration: Forward-Backward Charge Asymmetry of Electron Pairs above the  $Z^0$  Pole, Physical Review Letters 77 (1996) 2616-2621
17. The CDF collaboration: Further Properties of High-mass Multijet Events at the Fermilab Proton-Antiproton Collider, Physical Review D54 (1996) 4221-4233
18. The CDF collaboration: Measurement of the  $\gamma + D^{*\pm}$  Cross Section in  $\bar{p}p$  Collision at  $\sqrt{s} = 1.8$  TeV, Physical Review Letters 77 (1996) 5005-5010
19. The CDF collaboration: Measurement of the Branching Fraction  $B(B_u^+ \rightarrow J/\psi\pi^+)$  and Search for  $B_c^+ \rightarrow J/\psi\pi^+$ , Physical Review Letters 77 (1996) 5176-5181
20. The CDF collaboration: Measurement of Dijet Angular Distributions by the Collider Detector at Fermilab, Physical Review Letters 77 (1996) 5336-5341
21. The CDF collaboration: Ratios of Bottom Meson Branching Fractions Involving  $J/\Psi$  Mesons and Determination of b Quark Fragmentation Fractions, Physical Review D54 (1996) 6596-6609
22. K. Hara et al: Application of Avalanche Photodiodes for Scintillating Fiber Readout, Nuclear Instrument and Methods in Physics Research A383 (1996) 252-255
23. The CDF collaboration: Observation of  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\Psi\Lambda$  at the Fermilab Proton-Antiproton Collider, Physical Review D55 (1997) 1142-1152
24. The CDF collaboration: Measurement of  $b\bar{b}$  Production Correlations,  $B^0\bar{B}^0$  Mixing, and a Limit on  $\epsilon_B$  in  $p\bar{p}$  Collisions at  $\sqrt{s} = 1.8$  TeV, Physical Review D55 (1997) 2546-2558
25. S.Kim: Observation of Top Quark Production using Kinematic Techniques at CDF, in proceedings of the 30th Rencontres de Moriond, Les Arcs, Savoie, France (1995), edited by J. Trân Thanh Vân, (1996) 23-31

(学位論文)

1. 猪野隆: Measurement of Prompt Photon Production in 1.8 TeV Proton-Antiproton Collisions. (物理学研究科博士論文, 1996年6月)
2. 林英一郎: Search for New Neutral Gauge Bosons in 1.8 TeV Proton-Antiproton Collisions. (物理学研究科博士論文, 1996年9月)
3. 下島真: Measurement of the Photon Angular Distribution in the W+Photon Production in 1.8 TeV Proton-Antiproton Collisions. (物理学研究科博士論文, 1997年1月)
4. 青田慎: A Measurement of Top Quark Mass and Kinematics Properties in Fermilab 1.8-TeV Proton-Antiproton Collisions. (物理学研究科博士論文, 1997年1月)
5. 渡孝宏: Monte Carlo Simulation of 6-jet Events in CDF Proton-Antiproton Collisions. (物理学研究科修士論文, 1997年2月)
6. 柴山忠久: Results of Cosmic-Ray Test of Scintillating Tile/Fiber Units for the CDF End Plug Electromagnetic Calorimeter and Performance Simulation. (物理学研究科修士論文, 1997年2月)
7. 奥富仁: シンチレーティング・ファイバー飛跡検出器の開発研究. (理工学研究科修士論文, 1997年2月)
8. 角谷崇行: CDF エンドプラグ部ブリシャワーカウンターに用いる多チャンネル光電子増倍管の性能研究. (理工学研究科修士論文, 1997年2月)

(講演)

1. 金信弘: CDFでのトップクォークの物理, 日本物理学会 (特別講演), 金沢大学 (平成8年4月)
2. 近藤 都登: ハドロンコライダーにおける超対称粒子の検出法, 日本物理学会, 金沢大学 (平成8年4月)
3. 佐藤 博之:  $W + \gamma$  and  $Z + \gamma$  Diboson Production at CDF, 日本物理学会, 金沢大学 (平成8年4月)
4. 林 英一郎: CDFにおける新中性ゲージ粒子 $Z'$ の探索, 日本物理学会, 金沢大学 (平成8年4月)
5. 角谷 宗行: CDF エンドブラグ部ブ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, 金沢大学 (平成8年4月)
6. 田中 雅士: 電磁カロリメーター用GSOクリスタルの特性, 日本物理学会, 金沢大学 (平成8年4月)
7. 原 和彦: CDF IFT 飛跡検出器の開発, 日本物理学会, 金沢大学 (平成8年4月)
8. 青田慎: Kinematic Properties of Top Quark Production at CDF, APS meeting, Indiana (平成8年4月)
9. 青田慎: Top Quark Mass at CDF, APS meeting, Indiana (平成8年4月)
10. 高野剛: Diphoton Production at CDF, APS meeting, Indiana (平成8年4月)
11. 浅川高史: High-Mass Multijet Events at the Fermilab Paroton-Antiproton Collider, 11th Topical Workshop on Proton-Antiproton Collider Physics, Padova, Italy (平成8年5月)
12. 大石竜太郎: Photon Production at CDF, 11th Topical Workshop on Proton-Antiproton Collider Physics, Padova, Italy (平成8年5月)
13. 池田拓文: Search for Diffractive Heavy Quarks Decaying into Electrons in CDF, 3rd Workshop on Small-x and Diffractive Physics, ANL, Illinois (平成8年9月)
14. 近藤都登: Top Quark Physics, 4th Topical Conference on Heavy Flavour Physics, KEK (平成8年10月)
15. 滝川紘治: CDFの最近の結果と次期計画, 日本物理学会 (特別講演), 佐賀大学 (平成8年10月)
16. 猪野 隆: CDFにおける光子生成断面積の測定, 日本物理学会, 佐賀大学 (平成8年10月)
17. 柴山 忠久: CDF エンドブ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宇宙線テスト及び GEANT シミュレーション, 日本物理学会, 佐賀大学 (平成8年10月)
18. 鈴木 隆史: JLC ハドロンカロリメーター用タイル/ファイバー系の光学特性, 日本物理学会, 佐賀大学 (平成8年10月)
19. 近藤都登: Present and Future in High Energy Physics, 湯川記念講演会, 西宮 (平成8年11月)
20. 金信弘: Jet Physics and New Particle Search with the CDF detector at Fermilab, Symposium on Physics in e-p Collision, 東京大学原子核研究所 (平成8年11月)
21. 原和彦: 最近のCDFの結果, 東京大学ICEPPシンポジウム (平成9年2月)
22. 下島 真: 重心系1.8TeV陽子-反陽子衝突での $W$ +光子生成における光子生成角分布の測定, 日本物理学会, 名城大学 (平成9年3月)
23. 秦 勝彦: 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, 名城大学 (平成9年3月)
24. 鈴木隆史: 補償型JLCハドロンカロリメーターのビームテストII, 日本物理学会, 名城大学 (平成9年3月)
25. 田中 雅士: 電磁カロリメーター用GSOクリスタルの特性(2), 日本物理学会, 名城大学 (平成9年3月)