II．素粒子実験グループ

教　授	滝川 紘治，金　信弘
助教授	受川 史彦
講　師	原　和彦，清矢 良浩
準　研	松永 浩之
学振 PD	武内 勇司
大学院生	26 名
学群 4 年生	3 名

素粒子実験グループは高エネルギー粒子加速器を用いた素粒子物理学実験 CDF，ATLAS，および JLC に参加しており，本年度もそれぞれ活発な研究活動が行なわれた．

【1】　陽子・反陽子衝突実験 CDF

CDF は，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た陽子・反陽子衝突実験で，日本をはじめアジア，北米，欧州の研究機関からなる計 11ヶ国の国際協力により行なわれている．テバトロンでは，1996 年の物理実験 Run I の終了後検出器および加速器の増強を経て，2001 年度より Run IIa 実験が開始された．

また 2005 年からは，テバトロン加速器のビーム輝度が更に増強された Run IIb 実験が予定されている．これに向けた新しい検出器増強も開始され，筑波大学グループでもいくつかのプロジェクトに参加している．

1996 年に前回の物理実験 Run I が終了した後，テバトロン加速器は，大幅な増強が行われ，ビーム輝度およびエネルギーが増大した．これに伴い CDF も，検出器の増強を行ってきたが，新しい検出器の建設を終え，2000 年のエンジニアリングランを経て，2001 年 6 月より本格的に物理データの収集 Run IIa を開始した．図 1(上) に Run II 実験でのテバトロンの瞬間ルミノシティを示す．これまでに，最高値 $\mathcal{L} = 4.7 \times 10^{31}\ \mathrm{cm}^{-2}\ \mathrm{s}^{-1}$ が達成されている．また，週毎の積分ルミノシティは $7 - 8\ \mathrm{pb}^{-1}$ が記録され，全積分ルミノシティでは $220\ \mathrm{pb}^{-1}$ を超える．CDF 検出器により記録されたデータ量は約 $180\ \mathrm{pb}^{-1}$ である．Run IIa 実験は，2004 年末まで続けられる予定で，その間に約 $2\ \mathrm{fb}^{-1}$ 相当の衝突事象の収集が見込まれている．

これは，CDF 実験がこれまでに Run I 実験において蓄積してきたデータのほぼ 20 倍に相当する．また，テバトロン加速器の重心系エネルギーは 1.8 TeV から 2 TeV に増強され，検出器も改良され検出効率も向上した．このため，データ量の増大のみならず，単位積分ルミノシティあたりの観測事象数の増加も期待できる．

筑波大学グループでは，Run II 用 CDF 検出器に関してシリコン飛跡検出器，端冠部カロリメータ，飛行時間検出器，およびデータ収集システムの建設・調整・運転を行なってきた．これらの検出器は順調に稼働しており，較正がなされて，物理解析に使用可能な段階に達している．

以下には，Run IIa 実験でこれまでに得られた物理解析の結果および今後期待される成果について主なものを記す．

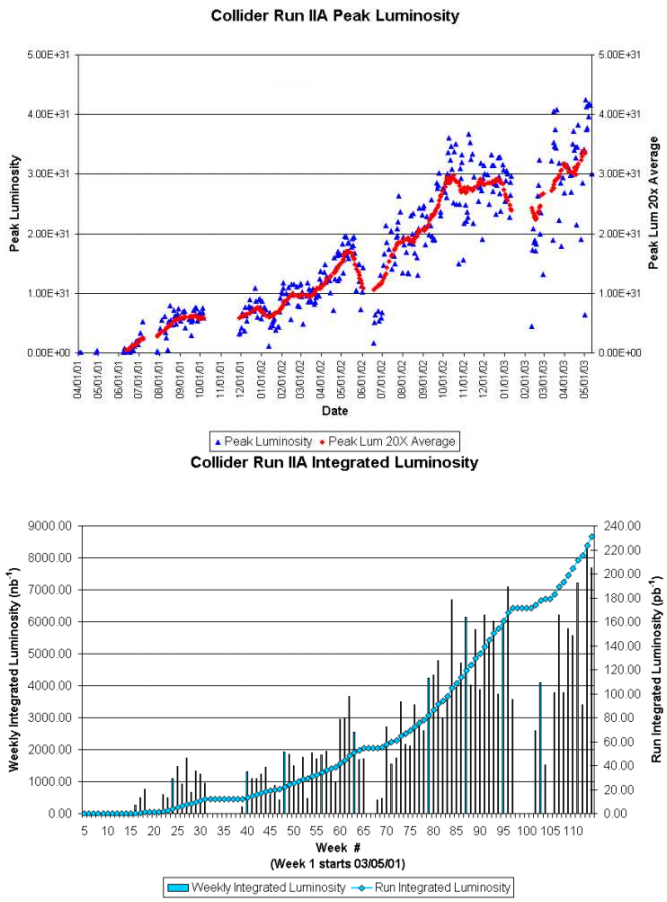

図 1: Run II 実験でのテバトロン加速器の性能．上：瞬間ルミノシティ．下：一週間毎および全積分ルミノシティ．

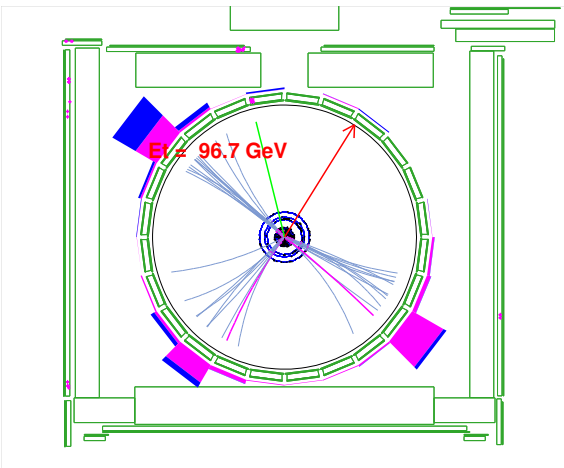

図 2: レプトン + ジェット・チャンネルでのトップクォーク候補事象．ふたつの b クォーク・ジェットが同定されている．

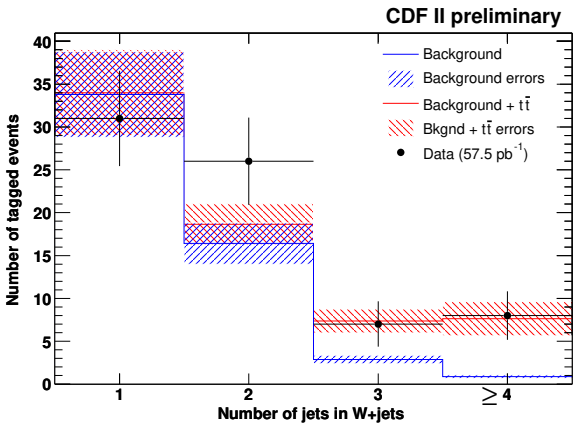

図 3: $W + n$-ジェット事象におけるジェット多重度の分布．

（1） Run IIa 実験データの物理解析

a） トップクォークの物理

トップクォークは，1995 年の CDF 実験による発見以来，数十の崩壊事象が再構成され，その性質に関する種々の測定がなされてきた．ただし，それらの測定はすべて比較的少ない事象数により統計的に制限されていた．Run IIa 実験ではこれまでの 20 倍のデータ量が期待され，トップクォークの測定はすべて大幅に向上する見込みである．

Run II でのトップクォーク事象の解析では，これまでに質量と生成断面積の測定が得られている．生成断面積の測定は，トップの崩壊で生成した W ボソンのうち片方がレプトンに崩壊するレプトン + ジェット・チャンネルと，両方の W ボソンがレプトンに崩壊する 2 レプトン・チャンネルで行われた．レプトン + ジェット・チャンネルでの候補事象を図 2 に示す．この事象ではふたつの b クォーク・ジェットが同定されている．W ボソンと複数のジェットの随伴生成におけるジェット多重度 n の分布を図 3 に示す．$n = 3$ および $n \geq 4$ においてトップクォークの信号に対応する事象が観測されている．これを用いて $t\bar{t}$

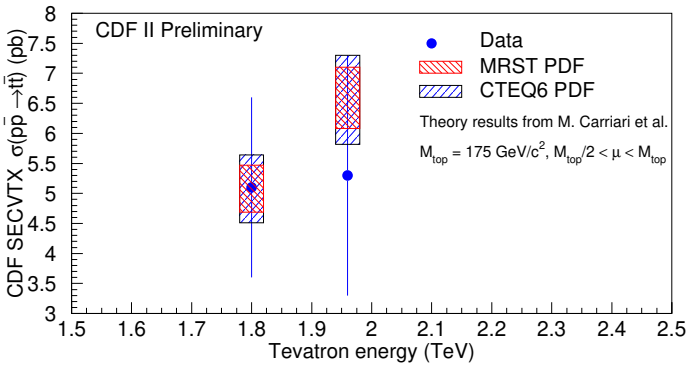

図 4: レプトン + ジェット・チャンネルから得られたトップクォーク対生成の生成断面積と理論予言との比較．Run I 実験での値も示す．

対生成断面積を $\sigma(\bar{p}p \rightarrow t\bar{t}X) = 5.3 \pm 1.9 \pm 0.8 \pm 0.3$ pb と測定した (図 4)．誤差はそれぞれ統計，系統，および積分輝度による．対応する 2 レプトン・チャンネルでの結果は，$\sigma(\bar{p}p \rightarrow t\bar{t}X) = 13.2 \pm 5.9 \pm 1.5 \pm 0.8$ pb である．共に，NLO での QCD 計算の値 $6.7^{+0.71}_{-0.88}$ pb (質量 $m_{\rm top} = 175$ GeV/c^2 を仮定) と一致している．トップクォークの質量は，レプトン + ジェット・チャンネルを用いて $m_{\rm top} = 171.2 \pm 13.4$ (stat) ± 9.9 (syst) GeV/c^2 と測定された (図 5)．

2 fb^{-1} のデータを蓄積すると約 1000 事象のトップクォーク対生成が再構成される．これらの事象により，トップクォークの質量は約 3 GeV/c^2 の精度で測定される．生成断面積の測定精度は 9%である．さらに，トップクォークからの崩壊で生成される $W^{\pm}$ ボソンの偏極度や $t\bar{t}$ 対でのスピン偏極度相関を測定することによる標準模型の検証が行なわれる．また，トップクォークの単一生成が観測されるはずであり，その断面積から部分幅 $\Gamma(t \rightarrow bW^+)$ を決定することが可能となり，小林・益川行列要素 $|V_{tb}|$ の直接測定が 13%の精度でなされる．さらに，トップクォークの荷電ヒッグス粒子 H^+ への崩壊 $t \rightarrow H^+b$ や，新粒子共鳴状態の $t\bar{t}$ 対への崩壊などの新しい物理の探索が期待される．

b) 電弱相互作用の物理

ゲージボソン生成の研究が Run I に引続き行われ，$W^+ \rightarrow \ell^+\nu$ および $Z^0 \rightarrow \ell^+\ell^-$ 崩壊事象を用いた，新たな重心系エネルギー 1.96 TeV での生成断面積の測定がなされた．図 6 に $W^+ \rightarrow e^+\nu$ 候補事象の横方向質量の分布を示す．図 7 は $Z^0 \rightarrow e^+e^-$ 候補事象の不変質量分布である．いづれの場合も，バックグラウンドの少ない再構成が実現されている．測定された生成断面積は

$$\begin{aligned} \sigma(\bar{p}p \rightarrow W^{\pm}X) \cdot \mathcal{B}(W^{\pm} \rightarrow \ell^{\pm}\nu) &= 2.64 \pm 0.01 \pm 0.09 \pm 0.15 \text{ nb} \\ \sigma(\bar{p}p \rightarrow Z^0X) \cdot \mathcal{B}(Z^0 \rightarrow \ell^+\ell^-) &= 267.0 \pm 6.3 \pm 15.2 \pm 16.0 \text{ pb} \end{aligned}$$

である．誤差はそれぞれ統計，系統，および積分輝度による．これらを重心系エネルギーの関数として示したものが図 8 である．Run I 実験での結果および CERN SppS での実験の測定も表示してある．1.96 TeV での断面積は 1.8 TeV の値より 9%ほど高い．

2 fb^{-1} のデータ量では，$W^{\pm}$ ボソンの質量の 30 MeV/c^2 の精度での測定が可能である．また，崩壊幅も 30 MeV/c^2 の精度で測定される．特に W ボソンの質量を前述のトップクォー

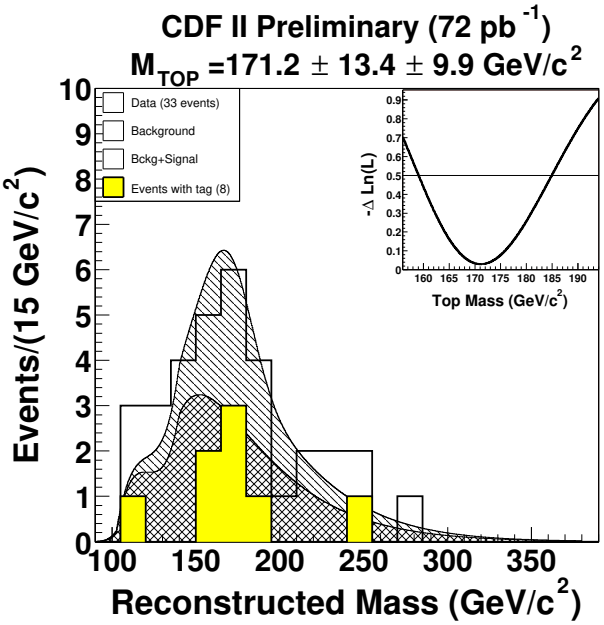

図 5: レプトン + ジェット・チャンネルを用いたトップクォークの質量の測定．

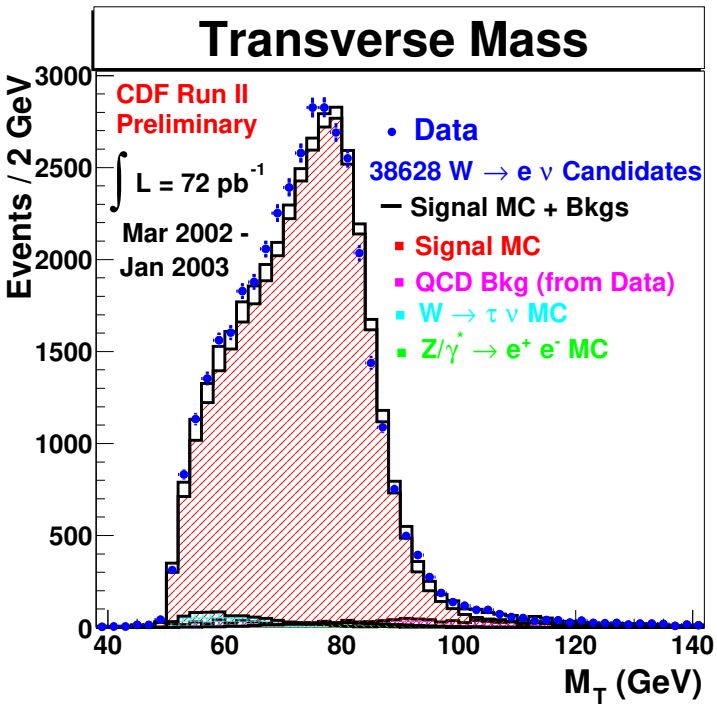

図 6: $W^+ \to e^+\nu$ 候補事象の横方向質量分布．

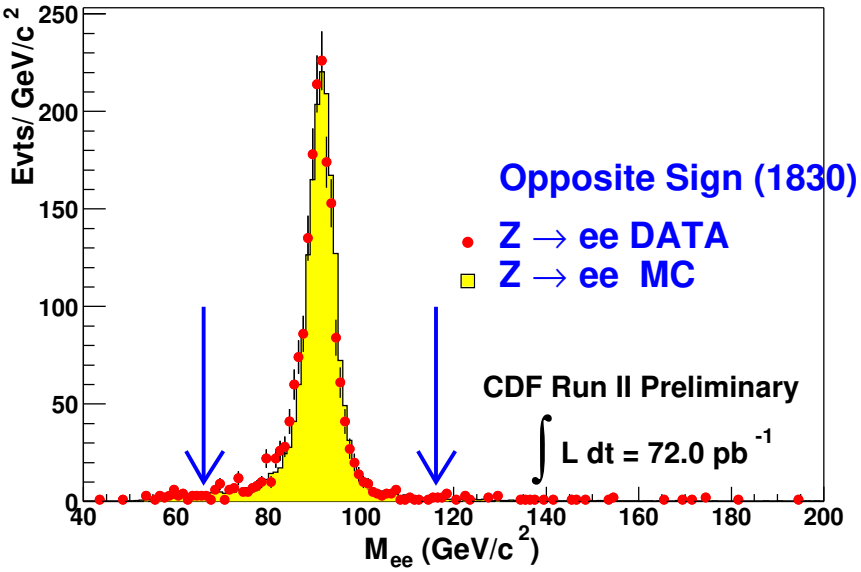

図 7: $Z^0 \to e^+e^-$ 候補事象の不変質量分布．

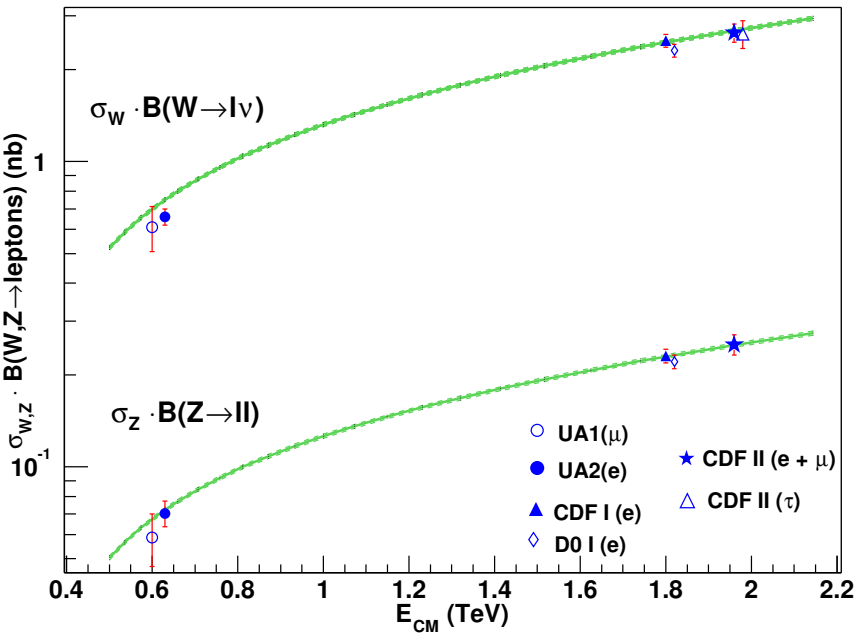

図 8: $W^{\pm}$ および Z^0 ボソンの生成断面積を重心系エネルギーの関数として表したもの．

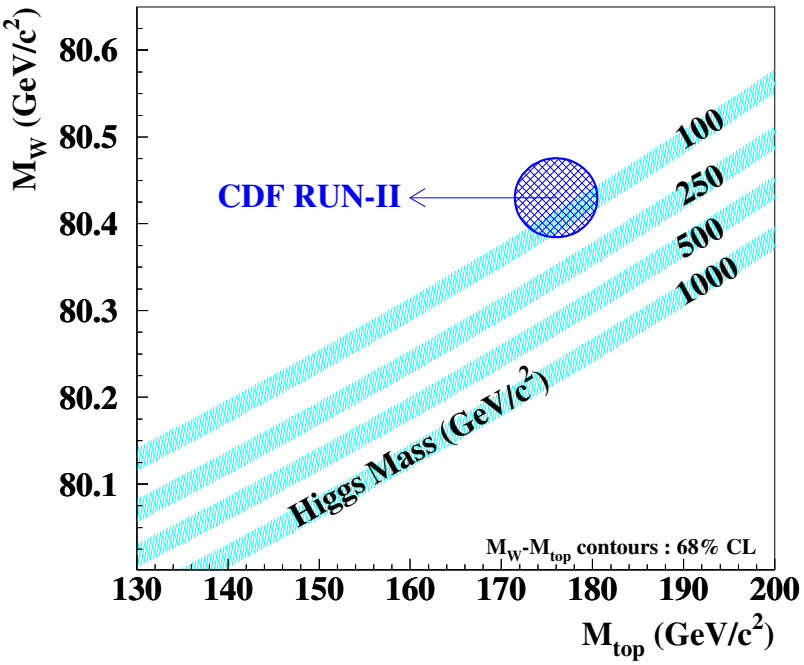

図 9: Run IIa 実験で期待される W ボソンとトップクォークの質量の測定精度，およびヒッグス粒子の質量に対する制限．

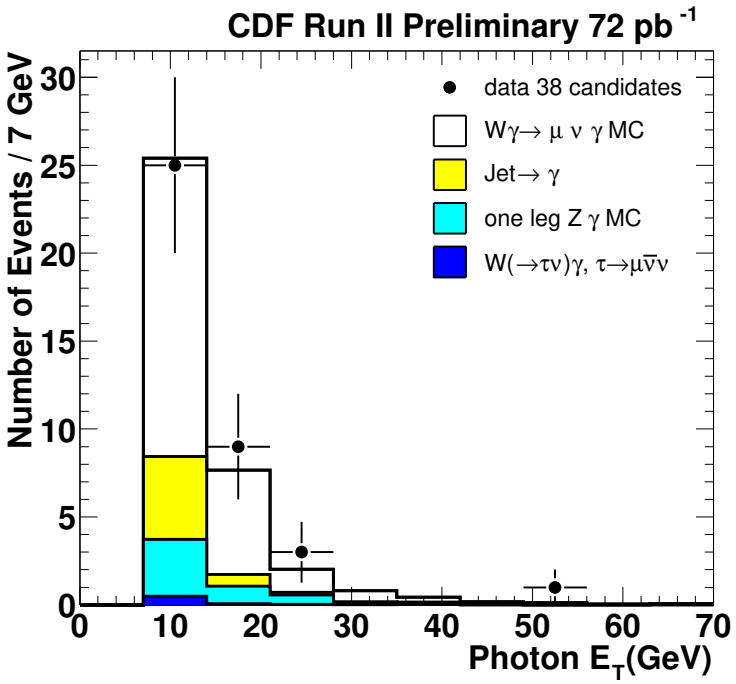

図 10: $W\gamma$ 対生成候補事象における光子の横方向エネルギーの分布．

クの質量の測定と組み合わせることにより，標準模型のヒッグス粒子を仮定した場合にその質量を約 30%の精度で間接的に測定することができる．これを図 9 に示す．

電弱相互作用のもう一つの研究対象に，ゲージボソンの対生成がある．電弱統一理論は非可換ゲージ理論であり，$W^+W^-Z^0$ や $W^+W^-\gamma$ などのゲージボソン同士の結合が存在する．Run II 実験のデータを用いて，W ボソンと光子の随伴生成が，光子の運動量 7 GeV/c 以上の領域で研究された．候補事象の数は，$W \to e\nu$ ($\mu\nu$) 崩壊モードにおいて 44 (38) である．これらは，標準模型の予言する 48.7 ± 5.0 (36.5 ± 3.6) 事象と矛盾しない．$W \to \mu\nu$ モードでの光子の横エネルギー分布を図 10 に示す．これらの測定は，$W^+W^-\gamma$ 結合や W ボソンの磁気能率に対する制限を与える．さらには，光子の角分布での輻射振幅零点の測定を行い，ゲージ粒子自己結合のより直接的な検証を行う．

また，1992 年から 1996 年にかけて行われた Run I 実験は約 100 pb^{-1} のデータを収集したが，それを利用して，$W^{\pm}$ ボソン対生成の生成断面積の測定を行った．この測定は，$W^{\pm}$ ボソンが両方ともレプトンに崩壊するチャネル ($W^+W^- \to l\nu l\nu$) では行われていたが，今回の解析では，より分岐比の大きな片方の W ボソンが二つのジェットに崩壊するチャネル ($W^+W^- \to l\nu qq$) を用いた．またバックグラウンドを除去するためにジェットの起源がクォークかどうかを判断する新しい手法を開発した．

c)　B 粒子・チャーム粒子の物理

陽子・反陽子衝突では b クォークの生成率が高いため，その崩壊を効率よく収集することができれば，精度の高い測定が可能となる．CDF 実験ではこれまでレプトンをトリガーに用いて B 粒子崩壊事象を収集してきた．Run II 実験ではこれに加えて，Silicon Vertex Trigger (SVT) と呼ばれる装置を導入した．これは，シリコン検出器の情報をトリガーの第 2 段階で用い，荷電粒子の飛跡の生成点に対する衝突パラメータを横運動量 $p_T > 2$ GeV/c の領域で 50 μm の精度で測定するものである．SVT を用いることにより，B 粒子やチャーム粒子などの長寿命粒子の崩壊物を選択的に収集することが可能となった．その信号の一例を図 11 に示す．データ量 65 pb^{-1} ですでに 450 k 事象という膨大な統計量の信号が得られている．これにより，チャーム粒子の物理は，CDF 実験における新たな研究対象となった．すでに，D^0 中間子の相対分岐比 $\mathcal{B}(D^0 \to K^-\pi^+)$, $\mathcal{B}(D^0 \to K^+K^-)$ および $\mathcal{B}(D^0 \to \pi^+\pi^-)$ の測定がなされている．また，クォークの種類を変える中性流による崩壊 $D^0 \to \mu^+\mu^-$ の探索が行われ，分岐比に対する上限値 $\mathcal{B}(D^0 \to \mu^+\mu^-) < 2.4 \times 10^{-6}$ (90% CL) が得られている．これは，PDG 2002 の値 $\mathcal{B} < 4.1 \times 10^{-6}$ より向上している．今後，$D^0\bar{D}^0$ 系における寿命差や CP 対称性の破れの探索がなされる予定である．

CDF Run IIa 実験での B 粒子の物理の目標のひとつは，ストレンジネスを持つ中性 B 中間子 B_s^0 の粒子・反粒子振動の観測である．これは期待される振動数 Δm_s が高いため，その固有崩壊時間を精度よく決定することが必要となる．事象毎の運動量測定を正確に行うため，B_s^0 の全再構成が可能な $\bar{B}_s^0 \to D_s^+\pi^-$ などの様式を用いる．この信号は，SVT を用いてトリガーされたデータ中に再構成されている (図 12)．振動数 Δm_s が 40 ps^{-1} 以下であるなら 5 標準偏差以上の統計的有意さを持った現象として観測され，その振動数 Δm_s は数%の精度で測定される．B_d^0 中間子の対応する振動数 Δm_d との比を取ることにより，小林・益川行列のユニタリ三角形の一辺の長さ $|V_{ts}/V_{td}|$ を精度よく決定できる．また，同じデータ中に B_d^0/B_s^0 中間子の軽いハドロン $h \equiv K/\pi$ への 2 体崩壊 $B^0 \to h^+h^-$ が観測されている (図 13)．$B_d^0 \to \pi^+\pi^-$ および $B_s^0 \to K^+K^-$ 崩壊での CP 非対称度を同時に測定することに

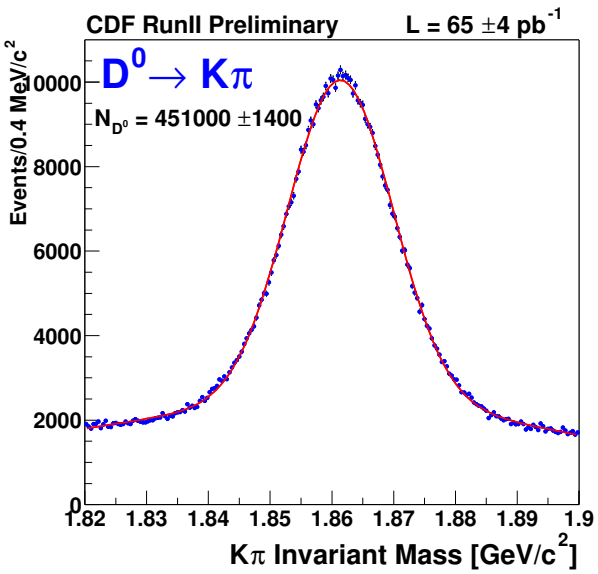

図 11: SVT を用いて収集したデータ中に再構成された $D^0 \to K^-\pi^+$ の信号．

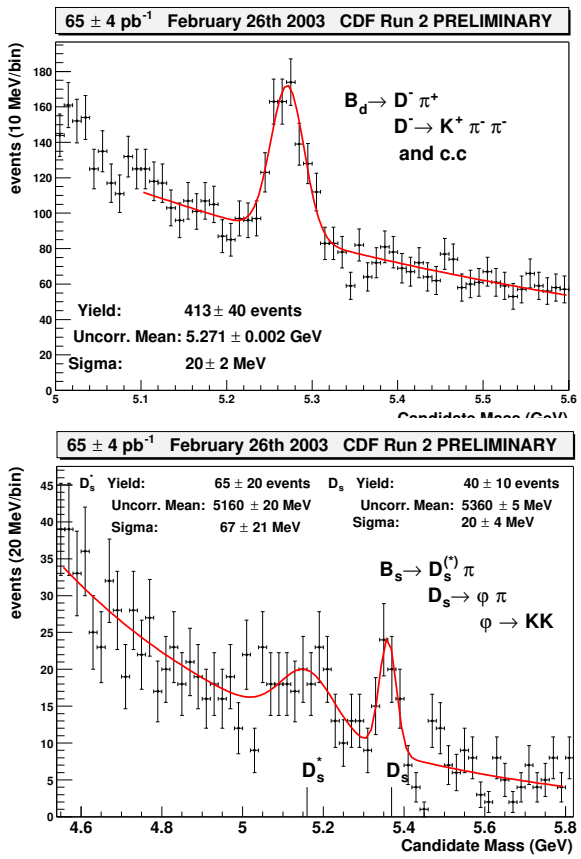

図 12: SVT を用いて収集されたデータ中に再構成された B 中間子の信号．上：$\bar{B}^0 \to D^+\pi^-$，$D^+ \to K^-\pi^+\pi^+$．下：$\bar{B}_s^0 \to D_s^+\pi^-$，$D_s^+ \to \phi\pi^+$．

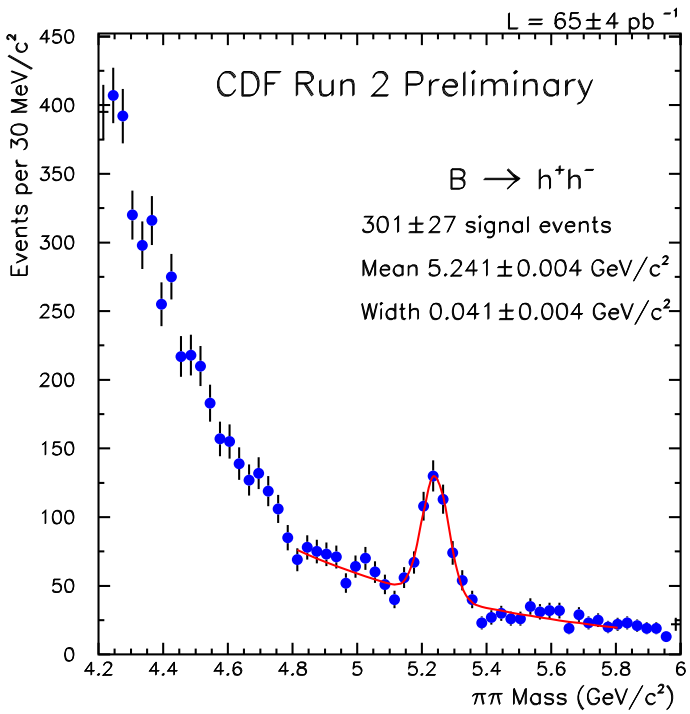

図 13: $B^0/B_s^0 \to h^+h^-$ 崩壊の信号．ここで $h^\pm$ は $\pi^\pm$ あるいは $K^\pm$ である．質量の再構成では $\pi^\pm$ の質量を仮定している．

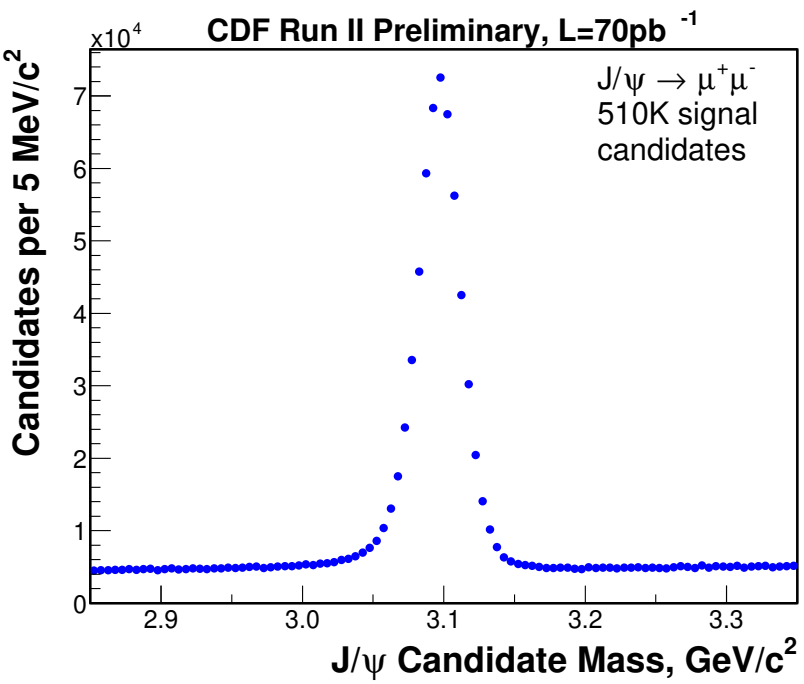

図 14: 低運動量の $\mu^+\mu^-$ 粒子対の J/ψ 領域での不変質量分布．

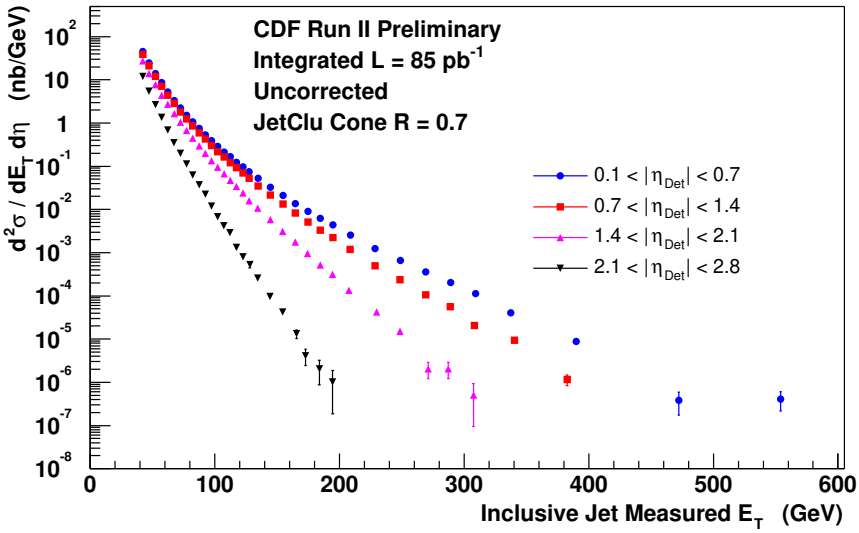

図 15: ジェットの包括的生成の断面積．

より，ユニタリ三角形の角度 γ を約 10° の精度で決定することができる．

レプトンをトリガーとする B 粒子の再構成も引続き重要な信号を供給している．$J/\psi \to \mu^+\mu^-$ 崩壊の信号を図 14 に示す．μ 粒子の運動量閾値が 2.2 GeV/c から 1.5 GeV/c に下げられた結果，単位データ量当りの J/ψ 生成率は約 2 倍となった．$B^+ \to J/\psi K^+$，$B^0 \to J/\psi K^{*0}$，$B^0 \to J/\psi K^0_S$，$B^0_s \to J/\psi\,\phi$，$\Lambda^0_b \to J/\psi\,\Lambda^0$ などの信号が再構成されており，質量，寿命，相対分岐比の測定がなされている．また，$B^0 \to J/\psi K^0_S$ 崩壊を用いた CP 非対称度 $\sin 2\beta$ の測定が ± 0.04 から ± 0.08 の精度でなされる．$B^0_s \to J/\psi\,\phi$ 崩壊での CP 非対称度測定の精度は ± 0.1 が予測され，もし大きな CP の破れが観測されれば，標準理論を超える新しい物理によるものとなる．単一レプトンは，セミレプトニック崩壊を効率よく収集するのに適しており，$\overline{B} \to \ell^-\bar{\nu}D^0X$，$\overline{B} \to \ell^-\bar{\nu}D^{*+}X$ や $\overline{B^0_s} \to \ell^-\bar{\nu}D^+_sX$ などの信号が再構成されている．個々の B 粒子種の寿命測定，寿命差の探索，さらに，比較的低い振動数 Δm_s での $B^0_s\bar{B}^0_s$ 振動の探索などが予定されている．

d) 強い相互作用・量子色力学の研究

新たな重心系エネルギー 1.96 TeV において，ジェットの生成断面積，ジェット対の不変質量分布，単一光子生成，$W^\pm/Z^0$ ボゾン生成，ボトムやチャームなどの重いクォークの生成，重いクォークとその反粒子の束縛状態クォークオニウムの生成などの測定を運動学的変数のより広範囲で高統計で行い，量子色力学の摂動論的計算の検証をする．また強い相互作用の結合定数 α_s やパートン分布関数のより高い精度での決定も CDF Run II 実験の重要な目標である．

図 15 は，異なるラピディティー領域における包括的ジェットの生成断面積の測定を示す．横方向エネルギーが 500 GeV 以上のジェットが観測されている．図 16 は，重心系エネルギー 1.96 TeV と 1.8 TeV でのジェット生成断面積の比を示したものである．高エネルギー領域での感度の向上が判る．

クォークオニウムのひとつである J/ψ 粒子の直接生成について，CDF Run I 実験での測定は理論予言を 50 倍も上回る値を観測した．前述のようにトリガーの $\mu^\pm$ 粒子に対する運

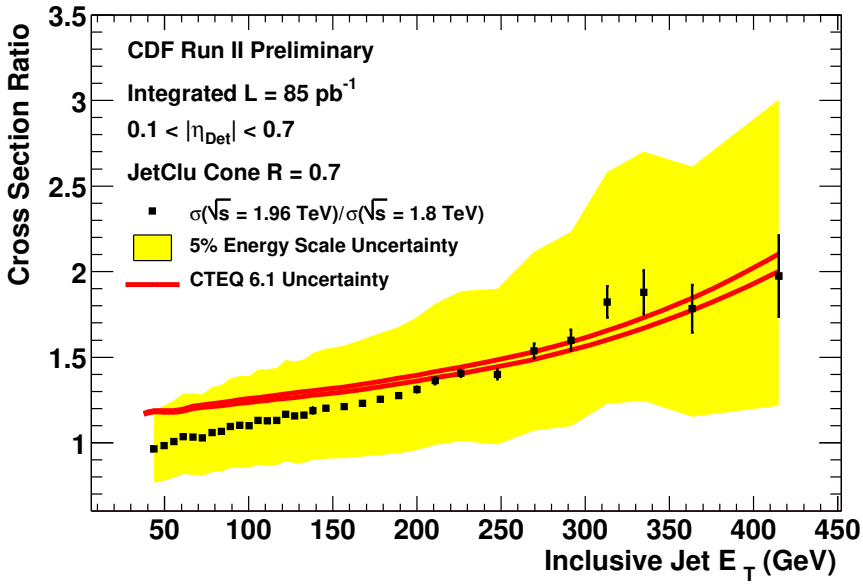

図 16: 重心系エネルギー 1.96 TeV と 1.8 TeV での包括的ジェット生成断面積の比．

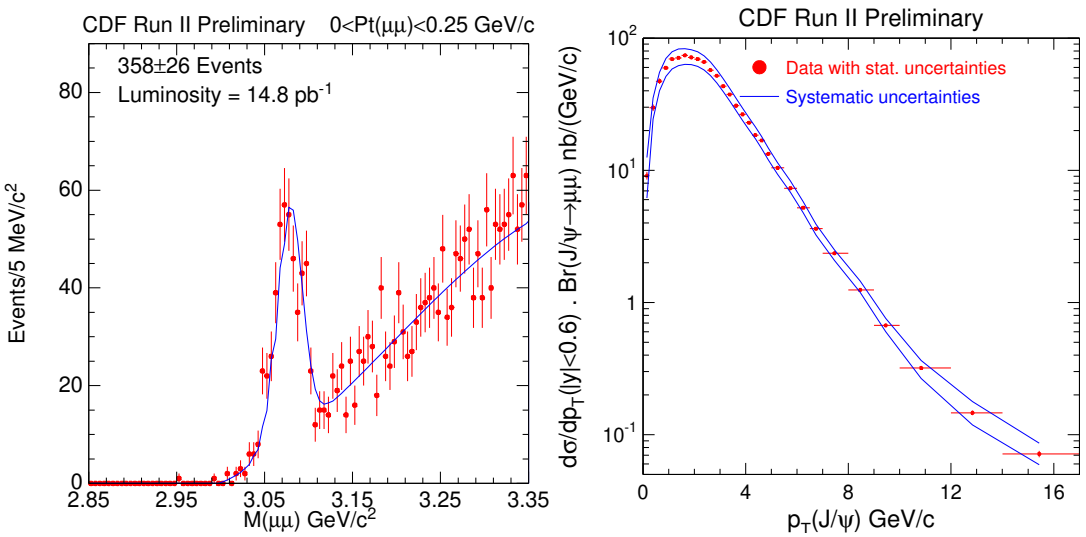

図 17: J/ψ 粒子の生成．左：横運動量 $p_T < 0.25$ GeV/c の領域での J/ψ の信号．右：生成断面積の p_T 依存性．

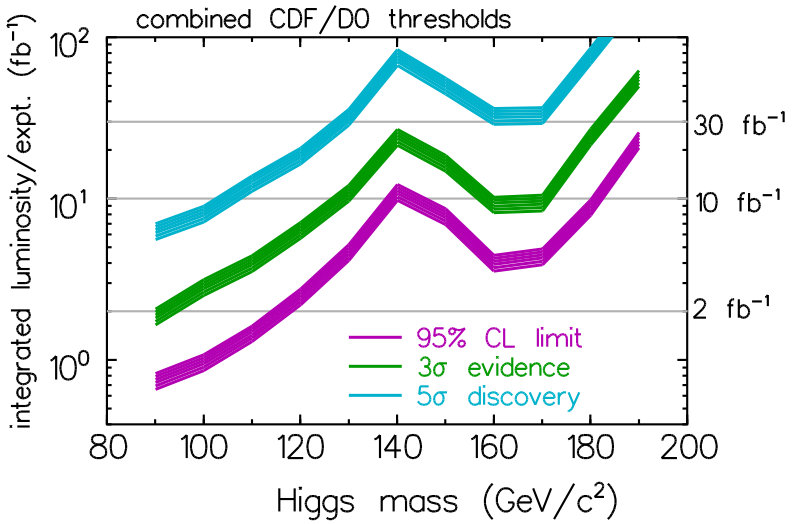

図 18: テバトロンでの標準模型ヒッグス粒子探索に必要なデータ量 (積算ルミノシティー) をヒッグス粒子の質量の関数として示したもの．3 本の帯は上からそれぞれ，(a) 5 標準偏差の統計的有意さをもって発見する，(b) 3 標準偏差の有意さで存在の証拠を示す，(c) もし存在しない場合に 95%の確度で排除する，ために必要なデータ量に対応する．

動量閾値が下げられたため，J/ψ 粒子の横運動量 $p_T^{J\psi}$ について 0 までの領域がすべて有感となった (図 17)．$p_T^{J/\psi}$ について積分すると

$$\sigma(\bar{p}p \to J/\psi X) = 240 \pm 1\,^{+35}_{-28}\ \mathrm{nb}$$

を得る．この閾値の変更は，J/ψ 生成時の偏極度の測定においても系統誤差の減少につながる．

e)　新粒子の探索

ヒッグス粒子，超対称性粒子やその他の新粒子の探索がなされる．標準理論のヒッグス粒子については，$2\ \mathrm{fb}^{-1}$ のデータを用いて，質量が $120\ \mathrm{GeV}/c^2$ 以下の領域で探索可能であり，もしその領域に存在しないのであれば 95%の確度で排除される (図 18)．この低質量領域では，ヒッグス粒子とゲージボソン $W^{\pm}$ あるいは Z^0 の随伴生成を探索するのが最も感度がよい．ヒッグス粒子は $b\bar{b}$ 対に崩壊する様式が支配的であり，トップクォーク事象の観測においてと同様に b クォークを同定し，ヒッグス粒子信号を探索する．質量 $150\ \mathrm{GeV}/c^2$ 程度以上の重いヒッグス粒子は，W^+W^- および Z^0Z^0 対への崩壊が非常に特徴的な信号となり，探索の感度は高い．中間領域では，$W^{\pm}$ 粒子と随伴生成されたヒッグス粒子が仮想的 W ボソン対に崩壊する過程で生じる同符合の高運動量レプトン対を用いて探索する．

標準理論の拡張においては，新たな $\mathrm{U}(1)$ ゲージ対称性を要求した模型が多く存在する．Z^0 ボソンと似た性質を持つ Z' ボソンが現れるが，CDF 実験ではそのレプトン対への崩壊を通じて，Z' ボソンの探索を行った．図 19 に電子・陽電子対候補事象の不変質量分布を示す．これは，既知の過程による生成で記述され，Z' ボソンの質量に対して下限値 $M_{Z'} > 665\ \mathrm{GeV}/c^2$ を与えた．

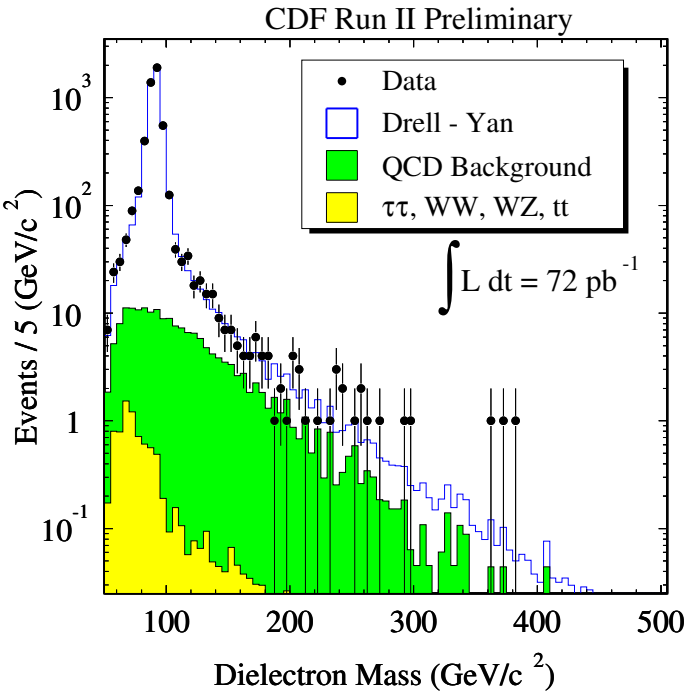

図 19: 高エネルギー電子・陽電子対候補事象の不変質量分布および Z' ボソンの探索．

以上は CDF Run IIa 実験においてこれまでに得られた結果および今後期待される成果を述べたものであるが，CDF 実験は LHC 加速器が稼働を始める 2007 年ごろまでは，エネルギー最先端の物理を産み出し続ける唯一の実験である．CDF 実験は最終的に約 15 fb^{-1} 相当のデータを蓄積する予定である．これは現在までのデータの百倍以上であり，素粒子物理学に対し多大な貢献をすると期待される．

（２） Run IIb 実験用検出器増強

a） SVX IIb 用シリコン飛跡検出器の開発

Run IIb では 15 fb^{-1} のデータを収集する予定であるが，現在 Run IIa で使用されているシリコン飛跡検出器は，放射線損傷のため，4 fb^{-1} 相当で性能が著しく劣化する．そのため，放射線耐性に優れた SVX IIb シリコン検出器の設計を行ない，今年度はシリコンセンサーの試作器を製作し，実機の製作を開始した．

新しいシリコンセンサーは寸法約 96 mm × 41 mm の片面読みだし型である．試作器として 116 枚を製作し，電気的，機械的特性を評価した．図 20 はこれらの暗電流ー電圧特性と暗電流値のヒストグラムである．ほとんどが 1000 V まで大きな電流増加を示さず，目標とする 500 V までの稼働を十分可能にしている．

また，製造元のデータと比較するためにデッドチャンネルを自動プローブを用いて評価した．製造元のデッドチャンネルはすべて確認できたが，いくつか製造元の検査方法では捉えられないものもあった．しかし，デッドチャンネルの割合は 0.08％と極めて低い．この他，長期安定性等にも優れている．

放射線を浴びたセンサーの性能を評価するために，$0.4\times10^{14}/\mathrm{cm}^2$ 中性子を照射し，様々な電気的性能の評価をした．この線量は最も内側のセンサーが $15\mathrm{fb}^{-1}$ の期間に浴びる量で

ある．全空乏化電圧の変化や暗電流の増化は既に知られている値となり期待通りであった．しかし，電極間容量，抵抗などを適正な値にするには，全空乏化電圧よりも 200 V 程度高い 300 V のバイアス電圧が必要である．開発したセンサーは 500 V の高電圧耐性をもつため，放射線照射後も十分な性能を発揮できる．

試作したセンサーに新しく開発された SVX4 読みだしチップを実装してノイズの評価を行った．現行のシリコン検出器よりも 3 割優れた S/N を実現できた．

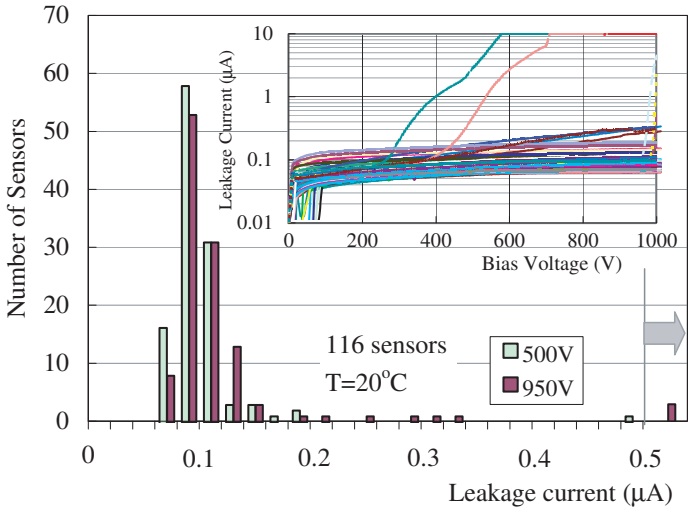

図 20: バイアス電圧 500V と 950V での暗電流値 (20° 換算値)．囲みは電流ー電圧特性．

b) 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 Run 0 実験の終了後に製作・設置されて Run I 実験以来稼動している．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 μs 程度の時間を要する．Run I 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 μs であった．Run II 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 IIb 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．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． 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透明ファイバーに連結され， 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．

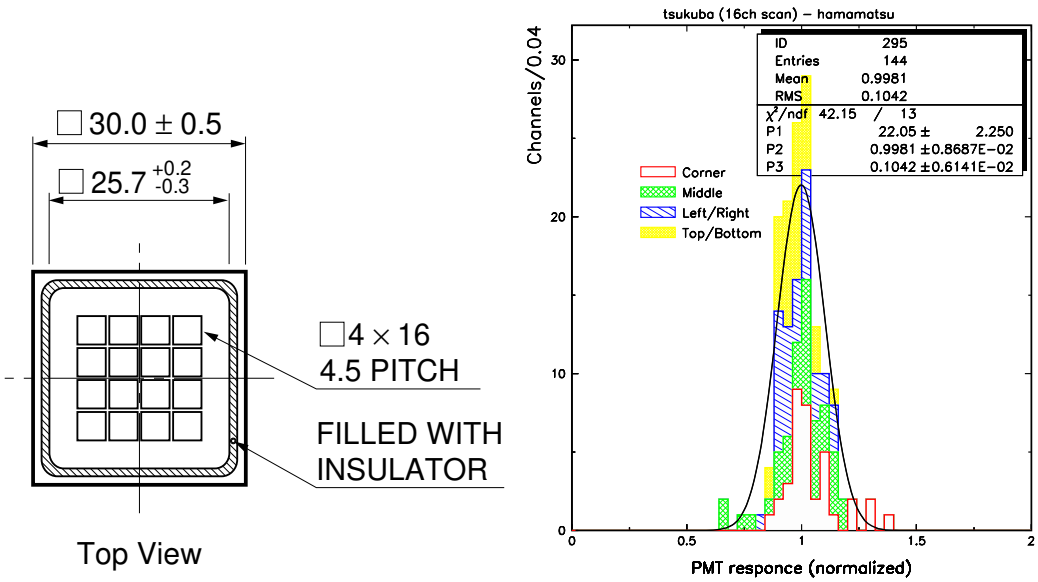

図 21: 左：マルチ・アノード光電子増倍管 H8711 の模式図．右：チャンネル中心での応答一様性．

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，光電陰極および増幅部 (ダイノード) は電気的に共通であるが，アノードが空間的・電気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 H8711A10-MOD (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 × 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 21)．

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 21 (右) 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ー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 106 程度と充分な値が得られている．読み出しエ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 本の製作を行った．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・較正データの取得を行う予定である．

【2】　LHC ATLAS 実験

欧州セルン研究所は，2007 年に重心系エネルギー 14 TeV での陽子・陽子衝突実験 LHC を開始する予定で，現在加速器の建設を進めている．LHC 実験の主要目標はヒッグス粒子の研究や新粒子の探索である．標準模型に基づいた予測では，ヒッグス粒子は 200 GeV/c^2 程度以下に存在するが，標準模型を超えた物理の枠組においても，ヒッグスが実際に存在するならば，LHC の高い重心系エネルギーを利することで，必ずヒッグスを発見できる．筑波大学は，この LHC 加速器での ATLAS 検出器 に用いるシリコン飛跡検出器の建設を担当している．また，ATLAS 検出器でのヒッグス検出のシミュレーションを行った．

（1）　LHC ATLAS 実験用シリコン飛跡検出器（SCT）

筑波大学グループは KEK のグループらと協力して，ATLAS 用シリコン飛跡検出器 SCT の設計開発を経て，4 枚のシリコンセンサーに読みだしエレクトロニクスを取り付けたモジュールの建設を 2002 年 2 月から開始した．SCT バレル部分は，全数で 2112 台のこの様なモジュールから構成されている．日本グループはこのうち 900 台のモジュール製造を担当している．

筑波大学グループは，以下に列挙するように，モジュールの精密組立て，電気的・機械的性能評価，モジュール据え付けロボットのプログラミングの担当をしている．

- シリコン検出器の優れた位置分解能を最大限に発揮するためには，モジュールを高い精度で組み立てる必要がある．シリコンセンサーの位置マークを画像処理により読みとり，その値を帰還することで自動的に片面 2 枚のセンサー位置を調節するシステムを開発した．上下 2 枚ずつのペアはリニアベアリングにより位置合わせされ接着・組立が行われる．図 22 は最初の 200 台について測定された組み立て精度を時系列で示している．組み立て寸法は別途の装置で計測し，中心値がずれないように組み立てパラメータを微調整していく．目標は 5 μm であるが，微調整は収束し，最近のモジュールは 2 μm 程度の精度で組み立てられていることが分かる．現在は 1 日 2 モジュールのペースで量産を続けている．

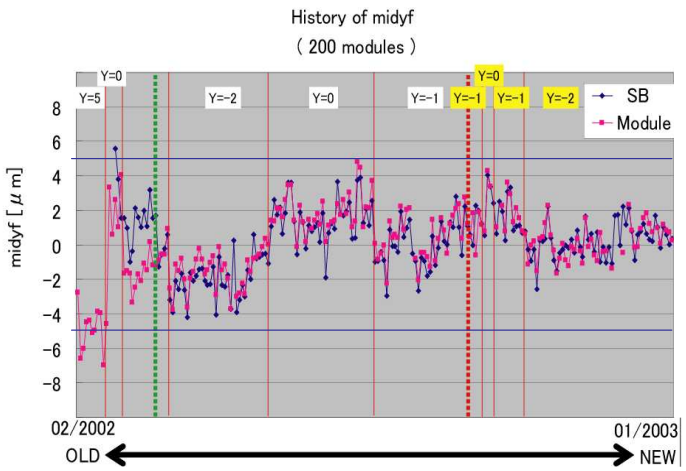

図 22: モジュール組み立て精度の変遷．縦線は組み立てパラメータを微調整した時期．

- 量産モジュールの寸法測定，ノイズやデッドチャンネル評価などの電気的性能測定を岡山大グループらとともに分担した．暗電流の大きなモジュールについては，冷却 CCD カメラで発光を捕らえることで，暗電流の要因となっている箇所を同定した．製造過程で発生した問題は，製造方法へのフィードバックした．
- モジュールはバレル状のシリンダーにねじ止め設置されるが，モジュールを実際にねじ穴位置に移動し，ねじ止めするロボットアームの調整，および運用プログラグの開発を継続して行った．

SCT モジュールの組み立ては世界中の複数のサイトで開始されつつあるが，以上に述べた筑波大学グループの取り組みにより，日本サイトはいち早く量産開始の承認を受け，優れた性能のモジュール量産を継続している．量産は 2004 年 3 月までに終了する．

（2） ヒッグス粒子検出のシミュレーション

ヒッグス粒子の質量が $140\ \mathrm{GeV}/c^2$ 以上の場合は $H \to Z^0 Z^{*0} \to \ell^+\ell^-\ell^+\ell^-$ で発生する 4 つの荷電レプトン (電子またはμ 粒子) や $H \to W^+W^{*-} \to \ell^+\nu\ell^-\bar{\nu}$ からの荷電レプトン対により，比較的簡単に発見できる．これよりも軽い場合について，W/Z 衝突によるヒッグス生成を主として研究し，$H \to \gamma\gamma$ などにより発見能力を向上できることを示した．これにより，すべての質量域において，実験開始 1 年以内にヒッグスを発見できる，と予測できる．

【3】 JLC 実験

電子・陽電子衝突型線形加速器 JLC はトップクォークの精密測定やヒッグス粒子の性質の精密測定，標準模型を越える物理の探索を主な目的とした次世代の加速器で，第 1 期計画では重心系エネルギーは $210 \sim 500\ \mathrm{GeV}$，ビーム輝度は $2.5 \times 10^{34}\ \mathrm{cm}^{-2}\ \mathrm{s}^{-1}$ を目指し，衝突点には JLC 検出器が置かれる．現在，加速器および検出器の研究・開発が精力的に行われている．

（1） JLC 実験用カロリメータ

筑波大学グループは，KEK/新潟大/神戸大/信州大/甲南大のグループと共同で，JLC 検出器に最適なカロリメータを開発している．JLC 実験では，トップクォークやヒッグス粒子などの崩壊により発生する多数のジェットのエネルギーを精密に測定することが非常に重要となるので，カロリメータは単一の入射粒子に対するエネルギー分解能が優れると同時に，細かく分割された構造を有することが不可欠となる．カロリメータは電磁カロリメータとハドロンカロリメータの 2 つの部分からなり，両方共に鉛とシンチレータを交互に組み合わせたサンプリング型カロリメータとなっている．この検出器では，シンチレータ中にはめ込まれた波長変換ファイバーにより伝達される光が，光電子増倍管などの光検出器により電気信号として検出される．また，電子とハドロンとに対する応答が等しくなる (補償型) ように鉛とシンチレータの厚さを調整することにより，ハドロンに対するエネルギー分解能を改善している．

前年度まで主にハドロンカロリメータの基本的性能を評価してきたのに対し，本年度は電磁カロリメータに重点を置いて研究を進めた．

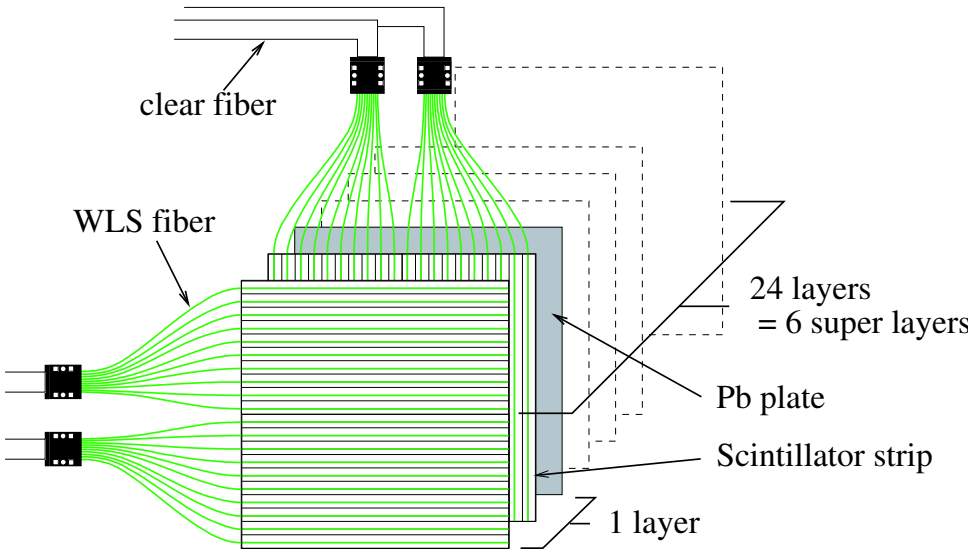

図 23: ビームテスト用に製作した電磁カロリメータのテスト・モジュールの模式図．

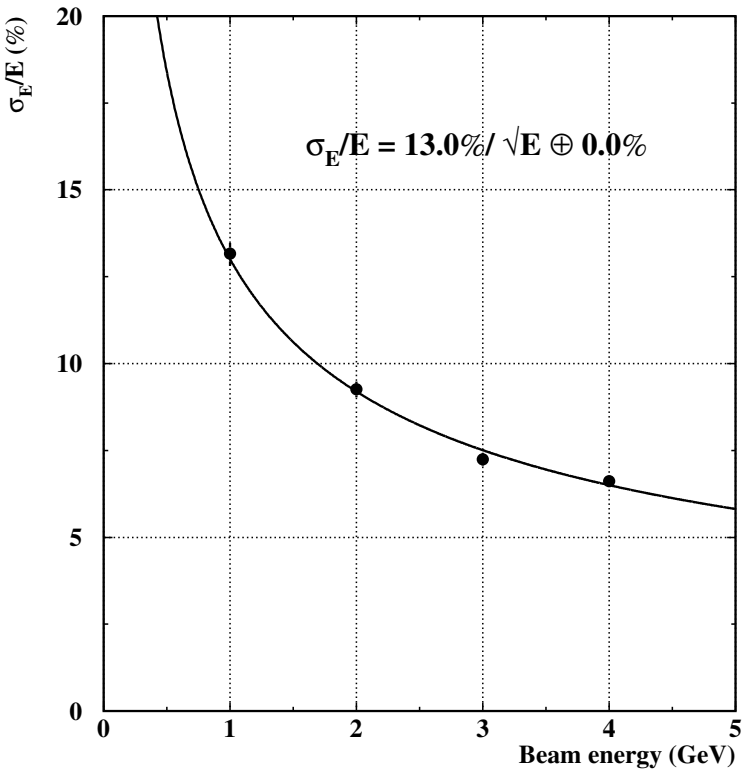

図 24: ビームテストで得られたエネルギー分解能．

4 mm 厚の鉛一層に対して，幅 1 cm，長さ 20 cm，厚さ 2 mm のストリップ型シンチレータを 20 枚ずつ縦・横に並べた細分割の電磁カロリメータのテスト・モジュール (図 23) を製作し，ビームテストにより性能を評価した．ビームテストは，2002 年 10 ~ 11 月に KEK の陽子シンクロトロンの $\pi 2$ ビームライン において，1 ~ 4 GeV/c の電子・μ 粒子を使用して行った．その結果，電子に対するエネルギー分解能や応答線形性は，ほぼ期待通りの性能が出ていることを確認した (図 24) . 入射電子に対する位置・角度の分解能測定では，4 GeV の電子に対してそれぞれ 2.0 mm （ シャワー最大付近 ），0.05 rad の分解能を得た．また，電磁シャワーの横方向及び奥行き方向の広がりを測定し，シャワーの形状を特徴づける関数に対するパラメータを決定した．さらに，今後シミュレーションによる性能評価をする上で必要となる応答の位置依存性も測定した．

【4】　外部資金

1. 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)」
   共同研究 (日本側参加機関 : 筑波大物理 , 高エネルギー加速器研究機構 , 広島大理 , 大阪市大理 , 早稲田大理工 , 岡山大理 , 近畿大理工 , 京都教育大理 . 日本側研究代表 : 金 信弘)
   校費 : 170,000 千円 , 旅費 : 13,000 千円

2. 科学研究費補助金 「質量起源と超対称性物理の研究計画調整」
   共同研究 (参加研究機関 : 筑波大物理 , 東京大理 , 名古屋大理 , 東北大理, 高エネルギー加速器研究機構 , 大阪大理 , 京都大理 , 研究代表者 : 金 信弘) 特定領域研究 (A)(1) 9,900 千円

3. 科学研究費補助金 「高エネルギー陽子・反陽子衝突によるヒッグス粒子の探索」
   共同研究 (研究代表者 : 金 信弘) 特定領域研究 (A)(2) 92,100 千円

4. 科学研究費補助金「ストレンジネスを持つ中性 B 中間子の崩壊特性の研究」
   共同研究 (研究代表者 : 受川 史彦) 基盤研究 (B)(2) 2,600 千円

【5】　研究発表

(1)　学会誌等への発表論文

1. "Search for Gluinos and Scalar Quarks in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV Using the Missing Energy plus Multijets Signature",
   T. Affolder *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **88**, 041801 (2002).

2. "Measurement of the Strong Coupling Constant from Inclusive Jet Production at the Tevatron $p\bar{p}$ Collider",
   T. Affolder *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **88**, 042001 (2002).

3. "Study of $B^0 \to J/\psi K^{(*)0}\pi^+\pi^-$ Decays with the Collider Detector at Fermilab",
   T. Affolder *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **88**, 071801 (2002).

4. "Search for New Heavy Particles in the WZ^0 Final State in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} =$ 1.8 TeV",
   T. Affolder *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **88**, 071806 (2002).

5. "Diffractive Dijet Production at $\sqrt{s} = 630$ and 1800 GeV at the Fermilab Tevatron",
   D. Acosta *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **88**, 151802 (2002).

6. "Υ Production and Polarization in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV",
   D. Acosta *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **88**, 161802 (2002).

7. "Search for New Physics in Photon-Lepton Events in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV",
   D. Acosta *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **89**, 041802 (2002).

8. "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",
D. Acosta *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **89**, 281801 (2002).

9. "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",
D. Acosta *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. D **65**, 052005 (2002).

10. "Searches for new physics in events with a photon and b-quark jet at CDF",
T. Affolder *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. D **65**, 052006 (2002).

11. "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",
D. Acosta *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. D **65**, 052007 (2002).

12. "Soft and hard interactions in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1800$ and 630 GeV",
D. Acosta *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. D **65**, 072005 (2002).

13. "Search for single-top-quark production in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV",
D. Acosta *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. D **65**, 091102(R) (2002).

14. "Charged jet evolution and the underlying event in proton-antiproton collisions at 1.8 TeV",
T. Affolder *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. D **65**, 092002 (2002).

15. "Measurement of B-meson lifetimes using fully reconstructed B decays produced in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV",
D. Acosta *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. D **65**, 092009 (2002).

16. "Search for the decay $B_s \to \mu^+\mu^-\phi$ in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV",
D. Acosta *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. D **65**, 111101(R) (2002).

17. "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",
D. Acosta *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. D **65**, 112003 (2002).

18. "Search for new physics in photon-lepton events in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV",
D. Acosta *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. D **66**, 012004 (2002).

19. "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",
D. Acosta *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. D **66**, 032002 (2002).

20. "Branching ratio measurements of exclusive B^+ decays to charmonium with the Collider Detector at Fermilab",
D. Acosta *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. D **66**, 052005 (2002).

21. "Cross section for forward J/ψ production in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV",
D. Acosta *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. D **66**, 092001 (2002).

22. "Search for radiative b-hadron decays in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV",
D. Acosta *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. D **66**, 112002 (2002).

23. "Momentum Distribution of Charged Particles in Jets in Dijet Events in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV and Comparisons to Perturbative QCD Predictions",
D. Acosta *et al.*, The CDF Collaboration, FERMILAB-PUB-02/096-E. Submitted to Phys. Rev. D May 24, 2002.

24. "Search for a W' Boson Decaying to a Top and Bottom Quark Pair in 1.8 TeV $p\bar{p}$ Collisions",
D. Acosta *et al.*, The CDF Collaboration, FERMILAB-PUB-02/247-E. Submitted to Phys. Rev. Lett. October 7, 2002.

25. "Search for Long-lived Charged Massive Particles in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV",
D. Acosta *et al.*, The CDF Collaboration, FERMILAB-PUB-02/318-E. Submitted to Phys. Rev. Lett. November 26, 2002.

26. "Search for Associated Production of Υ and Vector Boson in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV",
D. Acosta *et al.*, The CDF Collaboration, FERMILAB-PUB-02/351-E. Submitted to Phys. Rev. Lett. December 9, 2002.

27. "Search for the Supersymmetric Partner of the Top Quark in Dilepton Events from $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV",
D. Acosta *et al.*, The CDF Collaboration, FERMILAB-PUB-03/015-E. Submitted to Phys. Rev. Lett. February 7, 2003.

（２）　学会・研究会での講演（国内）

1. 受川 史彦：Recent Status of Tevatron CDF,
第 41 回 RHIC–SPIN-J Physics Discussion（2002 年 6 月 18 日），理化学研究所．

2. 受川 史彦：CDF は走ってます！,
実験・観測にもとづく素粒子統一描像の構築（2002 年 8 月 21 – 23 日），京都大学基礎物理学研究所．

3. 山田 豊：JLC カロリメータビームテスト結果；シャワーの奥行き方向の揺らぎ 3，
日本物理学会（2002 年 9 月 15 日），立教大学．

4. 皆川 真実子：Nd:YAG レーザーを用いたシリコンマイクロストリップ型検出器の性能評価，
日本物理学会（2002 年 9 月 16 日），立教大学．

5. 新間 秀一：ATLAS SCT シリコン検出器の長期安定性の研究，
日本物理学会（2002 年 9 月 16 日），立教大学．

6. 武居 康徳：CDF 実験用高耐放射性シリコン飛跡検出器の研究 II，
日本物理学会（2002 年 9 月 16 日），立教大学．

7. 武内 勇司：CDF Run IIa 実験におけるシリコン飛跡検出器の稼働状況，
日本物理学会（2002 年 9 月 16 日），立教大学．

8. 金 信弘：CDF 実験の現状と将来，
物理学セミナー（2002 年 11 月 22 日），大阪市立大学．

9. 新間 秀一：ATLAS での Vector Boson Fusion を用いた Higgs 探索，
広島ヒグス研究会（2003 年 1 月 14 – 15 日），広島大学．

10. 皆川 真実子：$H \to \gamma\gamma$ in Vector Boson fusion at ATLAS,
広島ヒグス研究会（2003 年 1 月 14 – 15 日），広島大学．

11. 金 信弘：CDF 実験の現状と将来,
物理学教室談話会（2003 年 1 月 17 日），名古屋大学．

12. 金 信弘：CDF 実験の現状と将来，
物理学セミナー（2003 年 1 月 22 日），新潟大学．

13. 皆川 真実子：MC Study on $H \to \gamma\gamma$ in the VBF Process at ATLAS,
第 9 回東大素粒子物理国際センターシンポジウム（2003 年 2 月 19 – 22 日），長野県白馬村．

14. 千石 大樹：MC Study on $H \to WW \to l\nu jj$ in the VBF Process at ATLAS,
第 9 回東大素粒子物理国際センターシンポジウム（2003 年 2 月 19 – 22 日），長野県白馬村．

15. 松永 浩之：CDF 実験の現状,
第 9 回東大素粒子物理国際センターシンポジウム（2003 年 2 月 19 – 22 日），長野県白馬村．

16. 加藤 陽一：“W+Higgs production at LHC”,
KEK Theory Meeting on Collider Physics, KEK, Tsukuba, Japan, February 20 – 22, 2003.

17. 受川 史彦：Tevatron CDF 実験の現状，
物理学第二教室談話会（2003 年 2 月 27 日），京都大学．

18. 原 和彦：CDF 実験の検出器開発と電弱物理の最新結果，
科研費特定領域研究会「質量起源と超対称性物理の研究」（2003 年 3 月 4 – 5 日），筑波大学．

19. 松永 浩之：CDF 実験の最新結果 - 新粒子探索とトップ物理，
科研費特定領域研究会「質量起源と超対称性物理の研究」（2003 年 3 月 4 – 5 日），筑波大学．

20. 松永 浩之：Tevatron accelarator and CDF detector,
基研研究会「素粒子高エネルギーフロンティアでの物理」（2003 年 3 月 17 – 18 日），京都大学基礎物理学研究所．

21. 受川 史彦：B physics and Heavy Quark Production at Tevatron,
基研研究会「素粒子高エネルギーフロンティアでの物理」(2003 年 3 月 17 – 18 日)，
京都大学基礎物理学研究所．

22. 武内 勇司：Top and EW phsycis at hadron collider,
基研研究会「素粒子高エネルギーフロンティアでの物理」(2003 年 3 月 17 – 18 日)，
京都大学基礎物理学研究所．

23. 高野 秀明：CDF-RUNI 実験における W ボソン対生成事象の探索，
日本物理学会 (2003 年 3 月 28 日)，東北学院大学．

24. 関口 克巳：JLC 電磁カロリメータビームテスト報告 IV：JLC ストリップファイバー電磁カロリメータのエネルギー線形性，分解能，
日本物理学会 (2003 年 3 月 28 日)，東北学院大学．

25. 山田 豊：LC 電磁カロリメータビームテスト報告 V：ストリップファイバー型電磁カロリメータの応答一様性とシャワー発達，
日本物理学会 (2003 年 3 月 28 日)，東北学院大学．

26. 武内 勇司：CDF Run II 実験の現状報告 2，
日本物理学会 (2003 年 3 月 29 日)，東北学院大学．

27. 千石 大樹：ATLAS SCT 用ハイブリッド及びモジュールの量産，
日本物理学会 (2003 年 3 月 29 日)，東北学院大学．

28. 新間 秀一：ATLAS SCT CCD カメラを用いたマイクロディスチャージデバッグ，
日本物理学会 (2003 年 3 月 29 日)，東北学院大学．

29. 皆川 真実子：LHC 計画アトラス実験における $VV \to H \to \gamma\gamma$ チャンネルによるヒッグス粒子探索，
日本物理学会 (2003 年 3 月 29 日)，東北学院大学．

(3)　国際会議・研究会での講演

1. Hiroyuki Matsunaga, “JLC Calorimeter”,
5th ACFA Linear Collider Workshop, University of Tokyo, Tokyo, Japan, July 10 – 12, 2002.

2. Fumihiko Ukegawa, “QCD Results from CDF”,
Current and Future Directions at RHIC, RIKEN BNL Research Center, BNL, Upton, NY, USA, August 5 – 23, 2002.

3. Hiroyuki Matsunaga, “Design and Performance of Fine-granularity Scintillator-strip EM Calorimeter Test Module”,
International Workshop on Linear Collider (LCWS2002), Jeju Island, Korea, August 26 – 30, 2002.

4. Hiroyuki Matsunaga, “Test beam studies of EM calorimeter test module”,
   Arlington Linear Collider Workshop, University of Texas at Arlington, Arlington, Texas, USA, January 9 – 11, 2003.

5. Norio Uchida, “JLC site study”,
   APPI 2003: Accelerator and Particle Physics Institute, Iwate, Japan, February 25 – 28, 2003.

6. Yuji Takeuchi, “Status and Prospects on Top Physics at CDF”,
   APPI 2003: Accelerator and Particle Physics Institute, Iwate, Japan, February 25 – 28, 2003.

（４） 国際会議報告書

1. F. Ukegawa, “QCD Results from CDF,”
   Proceedings of RIKEN BNL Research Center Workshop Vol. 45,
   Curret and Future Directions at RHIC, BNL, Upton, NY, USA, August 5 – 23, 2002,
   Report No. BNL-71035-2003, pp. 217 - 224.

（５） 学位論文

修士論文

1. 加藤 陽一：アトラス SCT バレルモジュールの精密組み立て法の確立と量産，
   筑波大学数理物質科学研究科，2003 年 2 月．

2. 佐藤 幸司：CDF 実験 CPR2 検出器に用いる多チャンネル型光電子増倍管の特性研究，
   筑波大学数理物質科学研究科，2003 年 2 月．

3. 新間 秀一：Diagnostic Testing of ATLAS Barrel SCT Modules，
   筑波大学数理物質科学研究科，2003 年 2 月．

4. 内田 訓雄：JLC 建設サイト選定のための地中常微動の測定と解析，
   筑波大学理工学研究科，2003 年 2 月．

5. 金子 寛：CDF 実験用粒子飛行時間測定器に用いる光電子増倍管の長期安定性の研究，
   筑波大学理工学研究科，2003 年 2 月．

6. 関口 克巳：JLC ストリップ・ファイバー電磁カロリメータの性能研究，
   筑波大学理工学研究科，2003 年 2 月．

7. 武居 康徳：CDF-SVXIIb 用シリコン飛跡検出器の試作と性能評価，
   筑波大学理工学研究科，2003 年 2 月．

8. 山田 豊：電磁シャワーの発達と揺らぎの研究，
   筑波大学理工学研究科，2003 年 2 月．

卒業論文

1. 永野 あい : JLC ストリップファイバー電磁カロリメータのビームテストによる応答一様性の研究，
   筑波大学第一学群自然学類，2003 年 2 月．

2. 山内 伸 : JLC ストリップファイバー電磁カロリメータに用いるマルチアノード光電子増倍管の性能研究，
   筑波大学第一学群自然学類，2003 年 2 月．

（6） 研究会の主催

1. 科学研究費特定領域研究会「質量起源と超対称性物理の研究」
   筑波大学大学会館国際会議室，2003 年 3 月 4 – 5 日．

2. CDF 実験日本グループ研究会
   筑波大学物理学系，2002 年 12 月 13 – 14 日．