# 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 |
| 助　手 | 戸村 友宣 |
| 準研究員 | 武内 勇司 |
| 科研費研究員 | 松永 浩之 |
| 大学院生 | 20 名 |
| 学群 4 年生 | 2 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 GLC に参加しており，本年度もそれぞれ活発な研究活動が継続して行なわれた．

## 【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加速器の瞬間ルミノシティを示す．これまでに，最高値 $\mathcal{L} = 7.2 \times 10^{31}\ \mathrm{cm}^{-2}\ \mathrm{s}^{-1}$ が達成されており，設計値 $8 \times 10^{31}\ \mathrm{cm}^{-2}\ \mathrm{s}^{-1}$ まであと一歩に近づいた．また，週毎の積分ルミノシティも $12\ \mathrm{pb}^{-1}$ を超え， 全積分ルミノシティは $500\ \mathrm{pb}^{-1}$ に達している ( 図 1 ( 中 ))．CDF 検出器により記録されたデータ量は約 $400\ \mathrm{pb}^{-1}$ である．図 1 ( 下 ) には米国会計年度毎の積分ルミノシティを示す．時間の経過とともに加速器の性能が向上していることが見てとれる．Run IIa 実験は，今後も継続され，近い将来に約 $2\ \mathrm{fb}^{-1}$ 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 1.96 TeV に増強され，検出器も改良・増強の結果，検出効率が向上した．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有効観測事象数の増加も得られている．

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，実データを用いた較正がなされて，物理解析に使用されている．

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

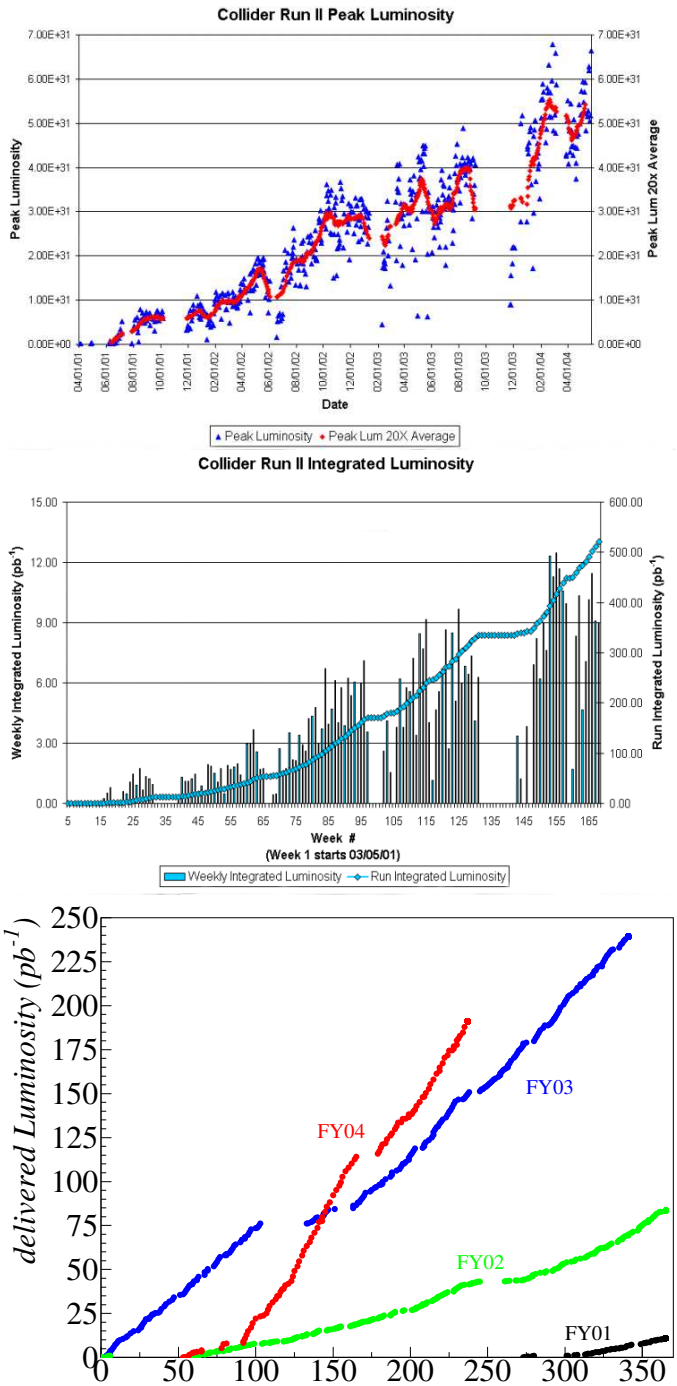


図 1: Run II 実験でのテバトロン加速器の性能．上：瞬間ルミノシティ．中：一週間毎および全積分ルミノシティ．下：米国会計年度毎の積分ルミノシティ．

について主なものを記す．

## (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，Run I 実験において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 II 実験において 2003 年度までに収集，解析されたデータ量は，Run I の約 2 倍に達し，トップクォークに関連したいくつかの測定においては，既に Run I と同等か，あるいは上回る精度の測定結果を得ている．

Run II において現在までに得られた結果のうち，以下にトップクォーク対生成断面積の測定，およびトップクォークの質量の測定の結果に関して述べる．

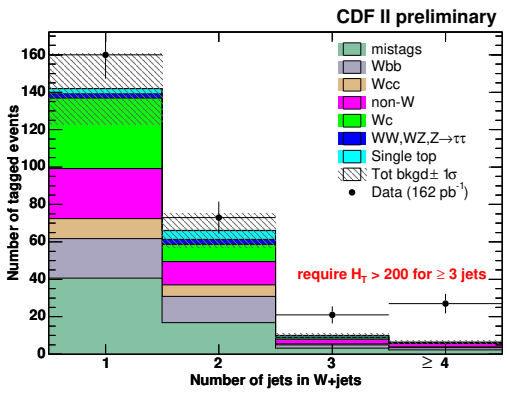


図 2: レプトン ＋ ジェット・チャンネルでの $W + n$-ジェット事象におけるジェット多重度の分布．積分ビーム輝度は，162 $\mathrm{pb}^{-1}$．点とヒストグラムは，それぞれデータと予想されるバックグランドを表す．ジェット多重度が 3 以上が信号領域．

トップクォーク対は，$t$ および $\bar{t}$ の崩壊で生成した二つの $W$ ボソンの崩壊様式にしたがって 3 つのカテゴリーに分類される．すなわち，$W$ 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，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，および，両方の $W$ ボソンがハドロン・ジェットに崩壊する全ジェット・チャンネルである．

図 2 は，レプトン ＋ジェット・チャンネル候補事象におけるジェット多重度 $n$ の分布を表している．$n = 3$ 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．この事象数を用いて $t\bar{t}$ 対生成断面積が $\sigma(\bar{p}p \to t\bar{t}X) = 5.6^{+1.2}_{-1.0}(\mathrm{stat})^{+1.1}_{-0.9}(\mathrm{syst})$ pb と決定された．同様に，他のチャンネル，あるいはレプトン ＋ジェット・チャンネルにおいて他の手法を用いて得られた断面積の測定結果を図 3 にまとめた．これらの結果は，$\sqrt{s} = 1.96$ TeV での NLO を用いた QCD 計算の値 $6.7^{+0.71}_{-0.88}$ pb（質量 175 GeV/$c^2$ を仮定）と一致している．

次に図 4 にレプトン ＋ジェット・チャンネルを用いて行なわれたトップクォークの質量測定の例を示す．図中のヒストグラムは，レプトン ＋ジェット・チャンネル候補事象において再構成されたトップクォークの質量分布を表している．この分布とある質量を仮定した

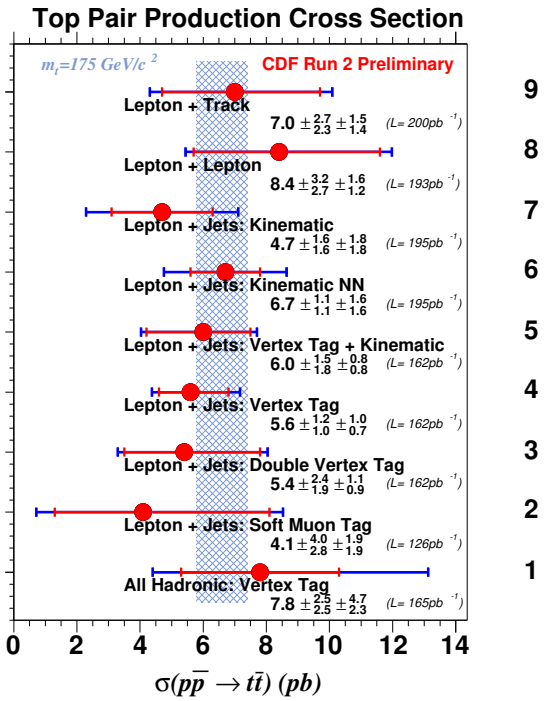


図 3: Run II におけるトップクォーク対生成断面積測定結果の一覧．各々の結果は，用いたチャンネル，または解析手法がそれぞれ異なっている．帯は理論予想の範囲を示す．

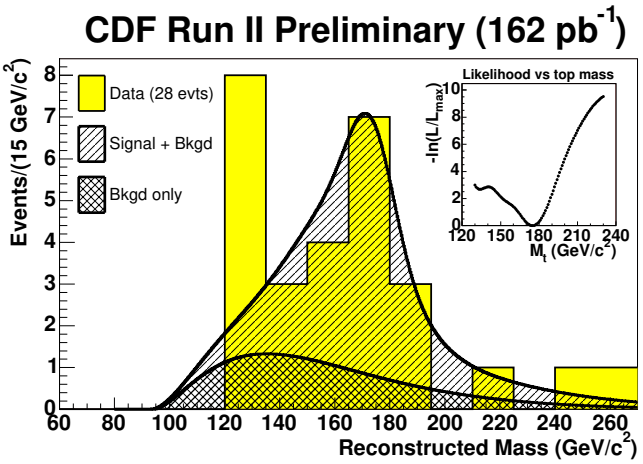


図 4: レプトン + ジェット・チャンネルでの再構成されたトップクォークの質量分布とトップクォークの質量の尤度関数 (右上挿入図)．

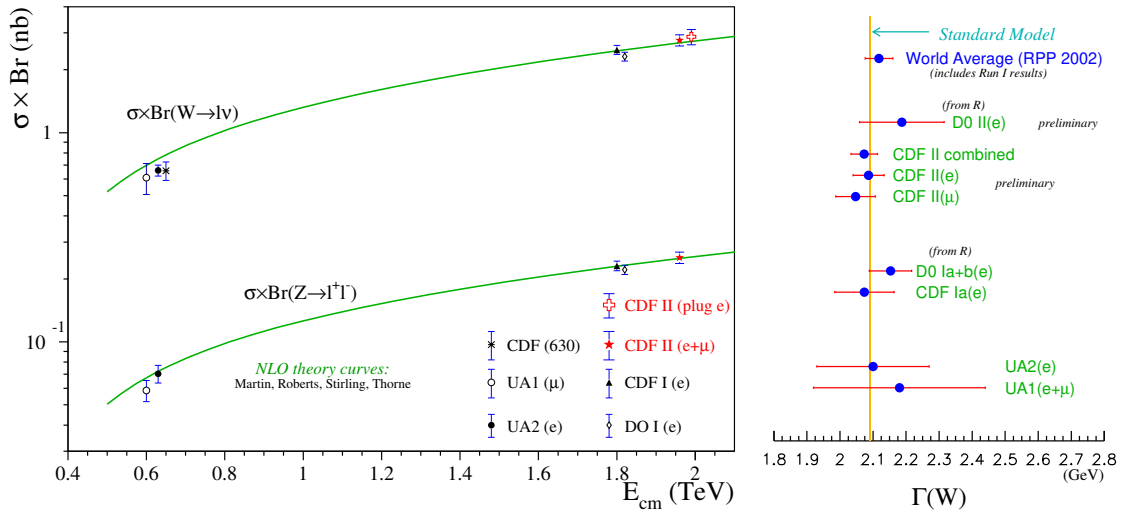


図 5: 左：$W^{\pm}$ および $Z^0$ ボソンの生成断面積を重心系エネルギーの関数として表したもの．右：$W$ ボソンの崩壊幅 $\Gamma_W$ の測定．

時の予想分布との一致度からトップクォークの質量に対する尤度関数が求められ，質量が $m_{\rm top} = 174.9\,^{+7.1}_{-7.7}({\rm stat}) \pm 6.5({\rm syst})$ GeV/c$^2$ と測定された．

トップクォークに関して当グループでは，$t\bar{t}$ 対生成断面積を求める際に必要となる信号やバックグラウンド事象に対する検出効率の計算に貢献した．また現在は，上述の例とは異なる手法を用いたトップクォークの質量測定や，トップクォーク対のスピン偏極度相関の測定などに取り組んでいる．

### (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，$W^+ \to \ell^+\nu$ および $Z^0 \to \ell^+\ell^-$ 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．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

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

である．誤差はそれぞれ統計，系統，および積分輝度による．また，プラグカロリメータを用いた $W$ ボソンの前方領域での生成も測定されており，中央部カロリメータを用いた結果とよく一致している．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 5 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．

また，上記の $W^{\pm}$ および $Z^0$ ボソンの生成率の比より，$W$ ボソンの崩壊幅 $\Gamma_W$ を $2.071 \pm 0.040$ GeV/$c^2$ と決定した．

図 6 に，200 pb$^{-1}$ のデータの $W \to \mu\nu$ 事象の横方向質量分布を示す．近い将来に期待される 2 fb$^{-1}$ のデータを用いることにより，$W^{\pm}$ ボソンの質量の測定を 30 MeV/$c^2$ の精度で行うことが可能である．崩壊幅は 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 7 に示す．

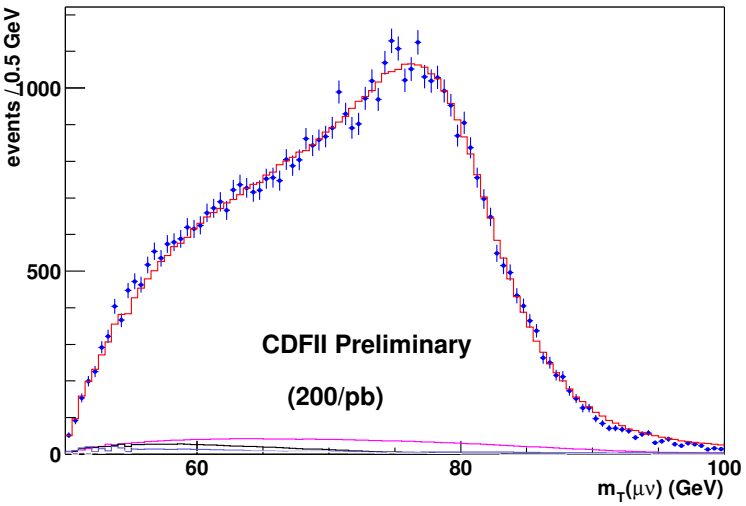


図 6: $W^+ \to \mu^+\nu$ 候補事象の横方向質量分布．今後，質量の測定がなされる．

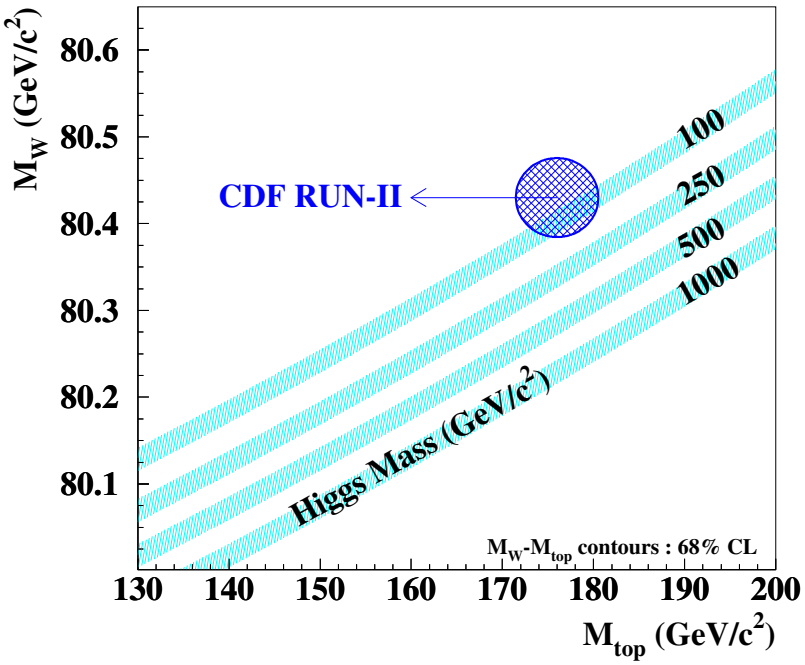


図 7: Run IIa 実験で期待される $W$ ボソンとトップクォークの質量の測定精度，およびヒッグス粒子の質量に対する制限．

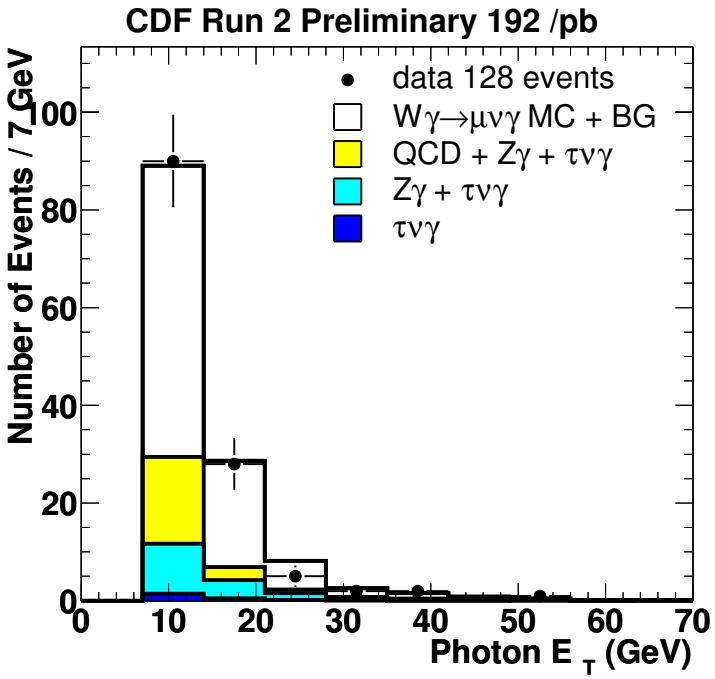


図 8: $W\gamma$ 対生成候補事象における光子の横方向エネルギーの分布．

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．$W$ ボソンの対生成が観測され，生成断面積が $\sigma(\bar{p}p \to W^+W^-X) = 14.3\,^{+5.6}_{-4.9} \pm 1.6 \pm 0.9$ pb と測定された．これは，理論の予言値 $12.5 \pm 0.8$ pb とよく一致している．また，$W$ 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 131 (128) である．これらは，標準模型の予言する $119.5 \pm 9.7$ $(136 \pm 10.4)$ 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 8 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．

### (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 $\mu$m 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 9 に示す．$D^0 \to K^-\pi^+$ 崩壊に関しては，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 $\mathcal{B}(D^0 \to K^-\pi^+)$, $\mathcal{B}(D^0 \to K^+K^-)$

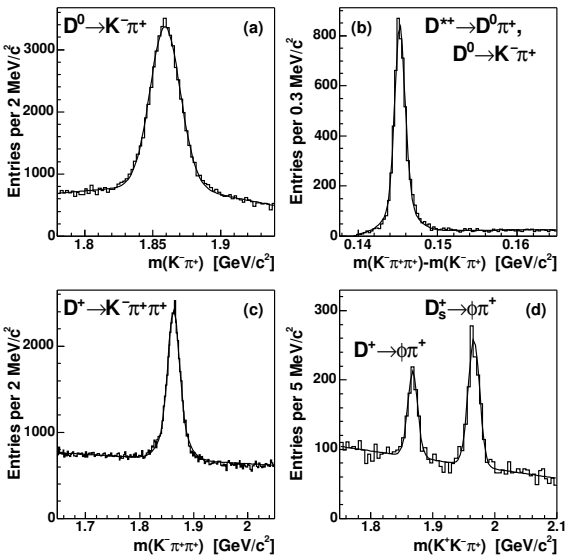


図 9: SVT を用いて収集したデータ中に再構成された種々の $D$ 中間子のの信号．

および $\mathcal{B}(D^0 \to \pi^+\pi^-)$ の測定がなされている．また，$D^0 \to K^+K^-$ および $D^0 \to \pi^+\pi^-$ 崩壊を用いた CP 対称性の破れの探索が行われ，それぞれ $A_{\rm CP} = (2.0 \pm 1.2 \pm 0.6)\%$ および $A_{\rm CP} = (1.0 \pm 1.3 \pm 0.6)\%$ が得られている．また，クォークの種類を変える中性流 FCNC 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 $\mathcal{B}(D^0 \to \mu^+\mu^-) < 2.5 \times 10^{-6}$ (90% CL) が得られている [1]．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 $\Delta\Gamma$ および質量差 $\Delta m$ の探索などが予定されている．

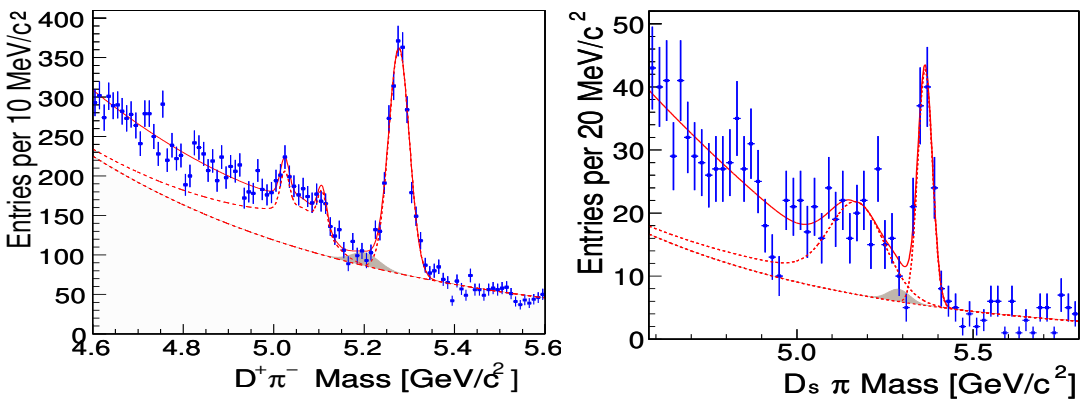


図 10: SVT を用いて収集されたデータ中に再構成された中性 $B$ 中間子の信号．左：$\bar{B}^0 \to D^+\pi^-$，$D^+ \to K^-\pi^+\pi^+$．右：$\bar{B}^0_s \to D^+_s\pi^-$，$D^+_s \to \phi\pi^+$．

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 $B^0_s$ の粒子・反粒子振動の観測である．これは予想される振動数 $\Delta m_s$ 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重要となる．事象毎の運動量測定を正確に行うため，$B^0_s$ の全再構成が可能な $\bar{B}^0_s \to D^+_s\pi^-$ 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 10 )．振動数 $\Delta m_s$ が標準模型で期待される 18 ps$^{-1}$ 程度であるなら 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 $\Delta m_s$ 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 $\Delta m_d$ 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 11 )．中央部飛跡検出器での $dE/dx$ 情報と質量分布を解析することによりその組成が測定され，生成率の比を

$$\frac{f_{b\to B_s^0}}{f_{b\to B_d^0}} \frac{\mathcal{B}(B_s^0 \to K^+K^-)}{\mathcal{B}(B_d^0 \to K^+\pi^-)} = 0.74 \pm 0.20 \pm 0.22$$

と決定した．また，$B_d^0 \to K^+\pi^-$ 崩壊における CP 非対称度も $A_{\rm CP} = 0.02 \pm 0.15 \pm 0.02$ と測定されている．これらは，$B_d^0 \to \pi^+\pi^-$ および $B_s^0 \to K^+K^-$ 崩壊での CP 非対称度の測定，さらにはユニタリ三角形の角度 $\gamma$ の決定に向けた第一歩である．また，Belle 実験において新物理の兆候として測定された $b \to s$ 遷移による崩壊 $B^0 \to \phi K_S^0$ に対応する荷電 $B$ 中間子の崩壊 $B^\pm \to \phi K^\pm$ も観測され，CP 非対称度 $A_{\rm CP} = -0.07 \pm 0.17^{+0.06}_{-0.05}$ を測定した．

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 12 に示す．$\mu$ 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 $J/\psi$ 生成率は約 2 倍となった．$B^+ \to J/\psi K^+$ ，$B^0 \to J/\psi K^{*0}$ ，$B^0 \to J/\psi K_S^0$ ，$B_s^0 \to J/\psi\,\phi$ ，$\Lambda_b^0 \to J/\psi\,\Lambda^0$ 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，FCNC による崩壊 $B_d^0/B_s^0 \to \mu^+\mu^-$ が探索され，それぞれ上限値 $\mathcal{B}(B_d^0 \to \mu^+\mu^- < 1.9 \times 10^7)$ および $\mathcal{B}(B_s^0 \to \mu^+\mu^- < 7.5 \times 10^7)$ ( ともに確度 95% ) を得ている．今後，$B^0 \to J/\psi K_S^0$ 崩壊を用いた CP 非対称度 $\sin 2\beta$ の測定が $\pm 0.04$ から $\pm 0.08$ の精度でなされる．$B_s^0 \to J/\psi\,\phi$ 崩壊での CP 非対称度測定の精度は $\pm 0.1$ 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の存在を示す確たる証拠となる．

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 $\overline{B}_s^0 \to \ell^-\bar{\nu}D_s^+X$ 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 $\Delta m_s$ での $B_s^0\bar{B}_s^0$ 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において高統計で行い，量子色力学の摂動論的計算の精密な検証が可能となった．また強い相互作用の結合定数 $\alpha_s$ 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 13 ( 上 ) 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 13 ( 下 ) は，包括的ジェット生成断面積の測定値と理論値の比較を示したものである．高エネルギー領域での感度が向上している．

また，$W$ ボソンとジェットの随伴生成の断面積を測定した ( 図 14 )．ジェットについて新たな定義を導入し，QCD 理論とのより厳密な比較が可能となった [3]．

クォークオニウムのひとつである $J/\psi$ 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

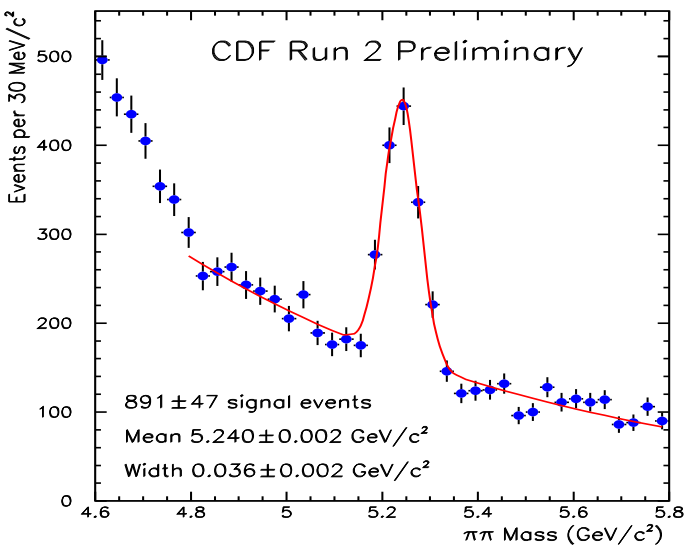


図 11: $B^0/B_s^0 \to h^+h^-$ 崩壊の信号．ここで $h^\pm$ は $\pi^\pm$ あるいは $K^\pm$ である．質量の再構成では $\pi^\pm$ の質量を仮定している．

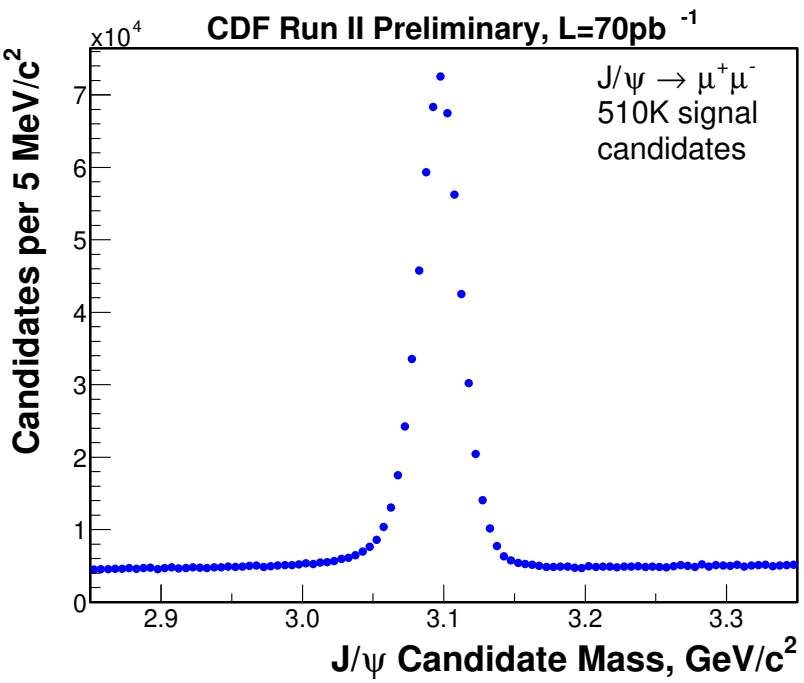


図 12: 低運動量の $\mu^+\mu^-$ 粒子対の $J/\psi$ 領域での不変質量分布．

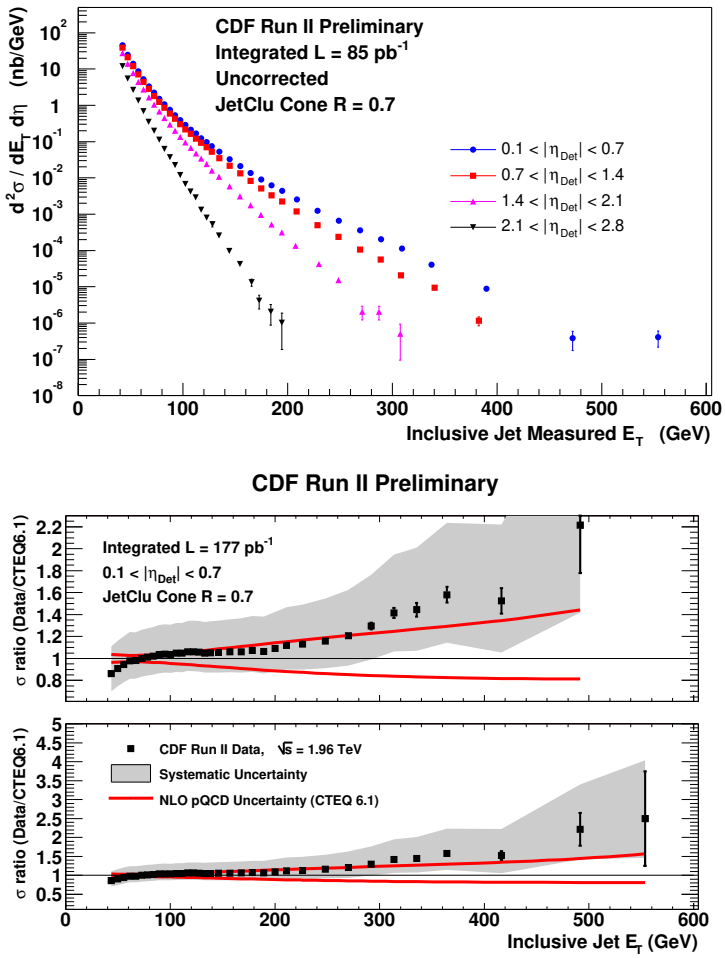


図 13: 上：ジェットの包括的生成の断面積，および下：包括的ジェット生成断面積の測定値と理論値の比をジェットの横運動量の関数として示したもの．

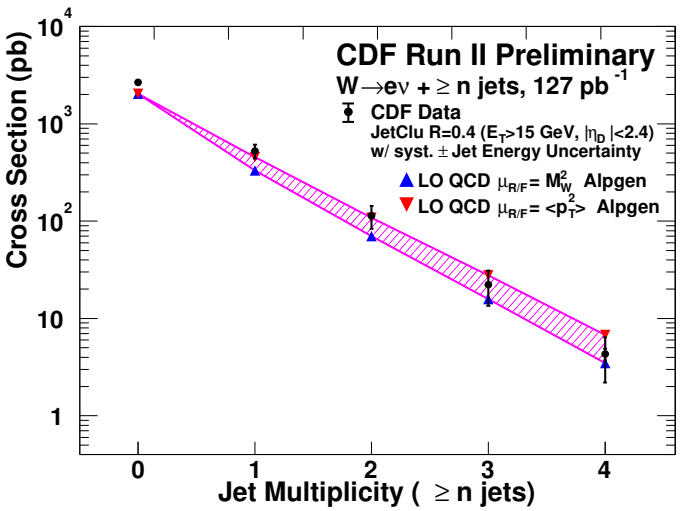


図 14: $W+$ ジェットの生成断面積．

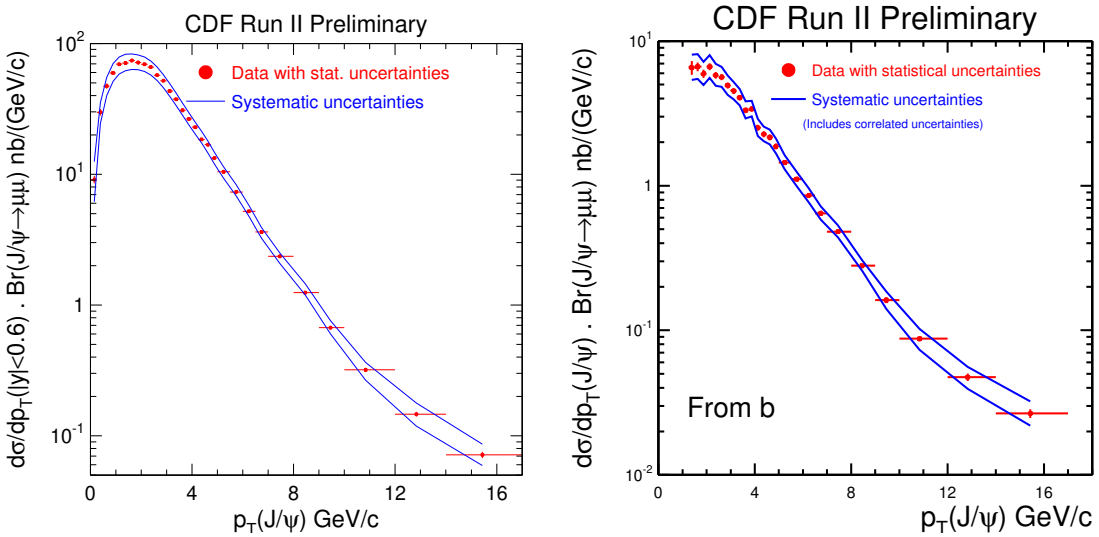


図 15: $J/\psi$ 粒子の生成断面積の測定の $p_T$ 依存性．左：すべての $J/\psi$ の断面積．右：$B$ 粒子の崩壊に起因する部分．

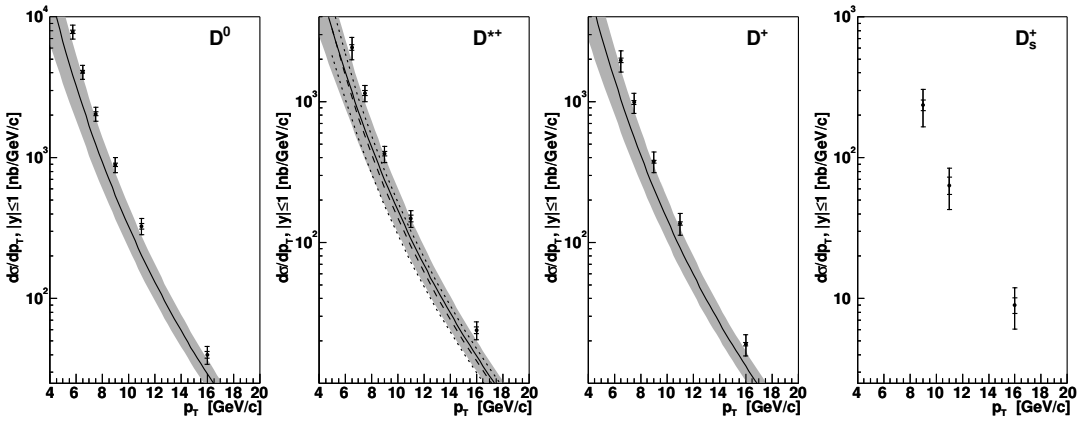


図 16: 種々の $D$ 中間子の生成断面積．

動量閾値が下げられたため，$J/\psi$ 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 15（左））．$p_T^{J/\psi}$ について積分すると $\sigma(\bar{p}p \to J/\psi X) = 240 \pm 1\,^{+35}_{-28}$ nb を得る．この閾値の変更は，$J/\psi$ 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．さらに，シリコン検出器を用いた $J/\psi$ 粒子の崩壊点の測定により，$B$ 粒子をその起源をする成分を統計的に分離し測定した（図 15（右））．これを用いて，$B$ 粒子の生成断面積をはじめて $p_T = 0$ の領域まで測定した．この量は，$b$ クォークの生成断面積と同一となり，$\sigma(\bar{p}p \to bX;\ p_T^b > 0,\ |y^b| < 0.6) = 29.4 \pm 0.6 \pm 6.2\ \mu$b が求められた．理論値は $23.5\,^{+11.6}_{-7.6}\ \mu$b であり，$p_T$ が数 GeV/$c$ 以上の領域におけるこれまでの測定結果の場合よりはるかによい一致を見た．$D$ 中間子の生成断面積も前述の SVT トリガーにより収集された信号を用いて測定された（図 16）．これは比較的運動量 $p_T$ の高い領域に感度があり，理論値と比較して 1.5 倍から 2 倍の値を示している [2]．

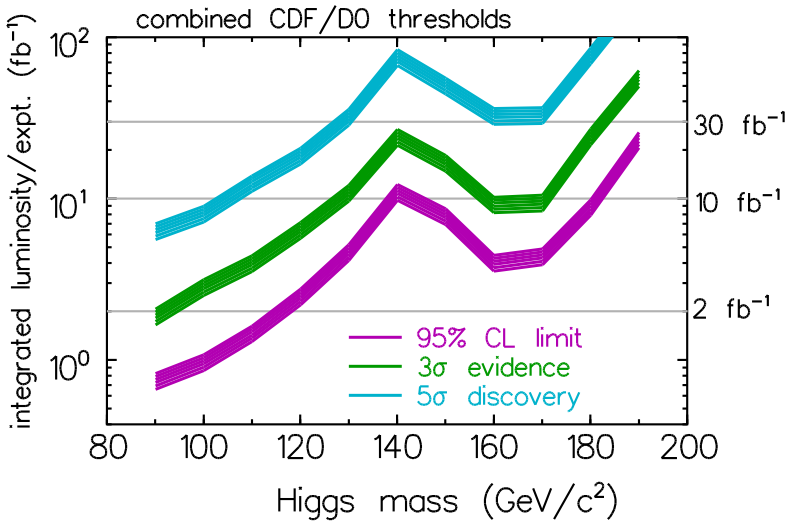


図 17: テバトロンでの標準模型ヒッグス粒子探索に必要なデータ量 ( 積算ルミノシティー ) をヒッグス粒子の質量の関数として示したもの．3 本の帯は上からそれぞれ，(a) 5 標準偏差の統計的有意さをもって発見する，(b) 3 標準偏差の有意さで存在の証拠を示す，(c) もし存在しない場合に 95%の確度で排除する，ために必要なデータ量に対応する．

### (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 fb$^{-1}$ のデータを用いて，質量が 120 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 17 )．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 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．$Wb\bar{b}$ 終状態を用いた探索ではすでに予備的な結果が得られており，軽い質量領域の生成断面積に対して標準理論の 10 倍程度の上限値が与えられた．

標準理論の拡張においては，新たな 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 18 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 $M_{Z'} > 750$ GeV/$c^2$ を与えた．

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 加速器が本格稼働し物理の結果を生みだし始める 2009 年頃までは，エネルギー最先端の物理を遂行する唯一の実験である．CDF 実験は最終的に $5-9$ 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近くとなり，素粒子物理学に対し多大な貢献をすると期待される．

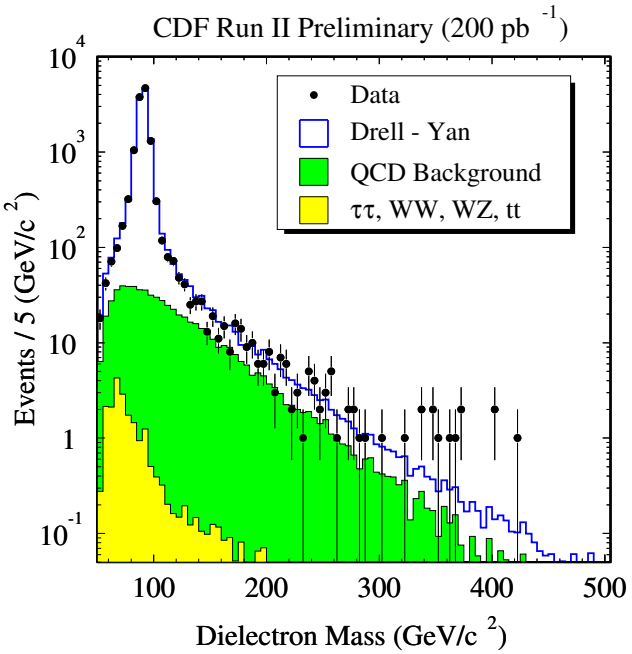


図 18: 高エネルギー電子・陽電子対候補事象の不変質量分布および $Z'$ ボソンの探索．

## (2) Run IIb 実験用検出器増強

### (a) 高耐放射線性シリコン飛跡検出器

シリコン飛跡検出器は位置分解能が極めて優れているため，CDF では，ビーム衝突点近くに設置し，B ハドロン等の 2 次崩壊点を再構成している．トップの測定やヒッグス粒子の探索に重要な検出器である．しかし衝突点に近いため放射線環境が厳しく，現在設置されているシリコン検出器は放射線損傷のため 4 $\mathrm{fb}^{-1}$ 相当で性能が著しく劣化する．

そのため，FNAL のグループらと協力して，放射線耐性に優れたシリコン検出器の設計を行い，筑波大学グループはシリコンセンサー本体の設計製造を分担した．

シリコンは放射線を浴びると不純物密度が変化し，暗電流が増加する．高耐放射線性のためには，不純物密度の増加とともに増加する作動電圧に検出器が耐え，発生する熱を有効に冷却できる構造にすることが重要となる．センサーを片面読み出しタイプとし，電極の構造を最適化することで 500 V の耐電圧のあるセンサーの製作を行った．

実際に製造された 954 枚の測定の結果，図 19 に示す様に，ほとんどが 1000 V まで大きな電流増加を示さず，十分に仕様を満たす．

これらの長期的な暗電流安定性，全空乏化電圧，不良チャンネルの評価等を自動プローブ装置を用いて系統的に行った．

長期試験の結果，大きな初期暗電流は一般的に減少する傾向にある．しかし，いくつかのセンサーでは 900 V 程度異常では増加する場合もみられた．総合的に判断すると 800 V 程度までならば安定した作動が可能であると結論される．

全空乏化電圧は 100 V 以上 250 V 以下に設定した. これは従来シリコンセンサーに用いられるものと比べると高純度であり，放射線耐性に優れている．実測したところ 8%のセンサーが 100V をわずかに下回る全空乏化電圧を示した．

不良チャンネルの割合は，インプラント電極の切断 0.02%，アルミ電極の切断 0.002%，ア

ルミ電極のショート 0.004% ，その 0.005%と評価された．合計した不良チャンネルは 0.03%と極めて低く，仕様とした 1%を大きく下回った．

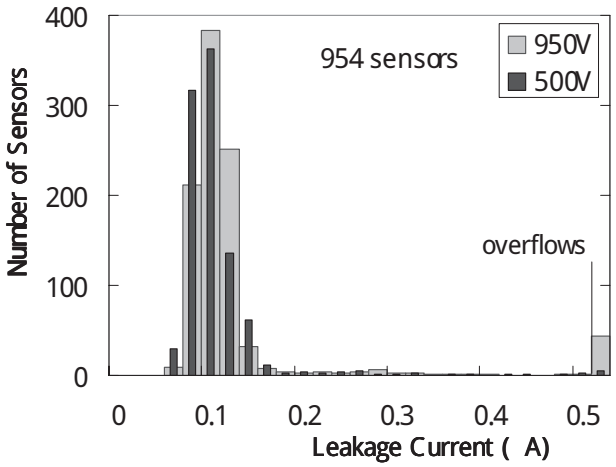


図 19: 500V と 980V での暗電流.

### (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 $\mu$s 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 $\mu$s 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．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

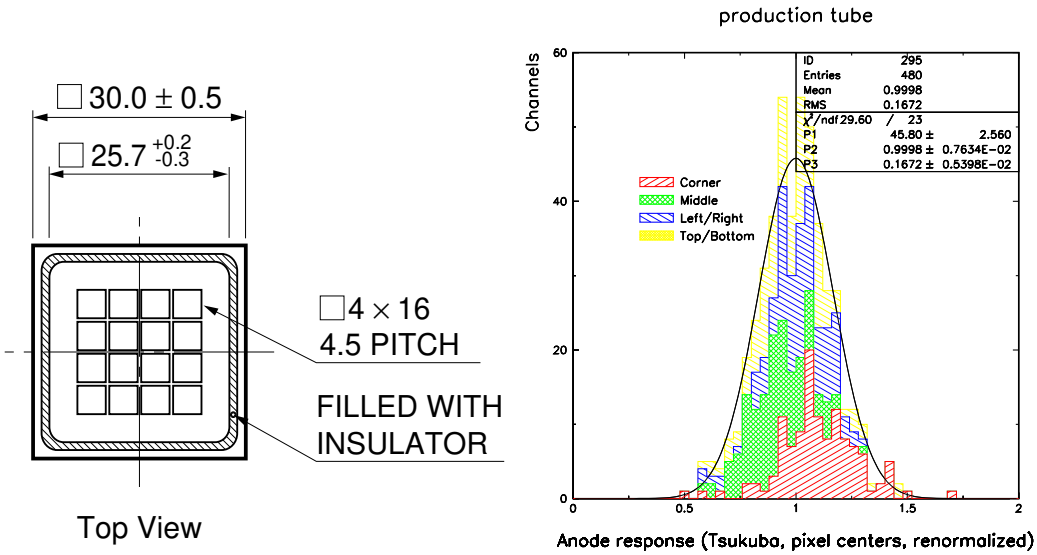


図 20: 左：マルチ・アノード光電子増倍管 H8711 の模式図．右：チャンネル中心での応答一様性．

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 20 左 )．

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．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 $10^6$ 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 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，その波高はおよそ 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 年度末に実機 30 本，2003 年度にはさらに 170 本の製作を行った．これらの合計は，必要最低数 192 に達しており，現在一様性その他の測定を行っている．30 本・計 480 チャンネルの応答一様性を図 20 ( 右 ) に示す．分布の標準偏差は約 17 %であり，許容範囲内に収まっている．

CPR2 検出器の設置は 2005 年度に予定されていたが，準備が順調に進行したため，今年度秋にその一部あるいはすべてを設置することに変更となった．

## 【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 を開始することを目標とし，現在加速器の建設を進めている．LHC 実験の最大の目的は質量の起源であるヒッグス粒子の研究である．標準模型に基づいて現在までの実験結果を解釈

すると，ヒッグス粒子は 200 GeV/$c^2$ 程度以下に存在すると予測されている．さらに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 800 GeV/$c^2$ 程度以下であり，LHC の高い重心系エネルギーを利することで，必ずヒッグスは発見できる．筑波大学は，この LHC 加速器での ATLAS 実験グループに属し，シリコン飛跡検出器の建設を担当している. また ATLAS 検出器をシミュレーションしてヒッグス検出の評価を継続している．

### (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 ) 用バレル部モジュールの建設を行っている. 1 台のモジュールは 4 枚のシリコンセンサーを裏表に 2 枚ずつ張り合わせたもので，読みだし ASIC を備え付けている．バレルモジュールの建設は，日-英-米-北欧による協力で 2002 年 2 月から開始したが，SCT バレル部全数で 2112 台のうち，我々のグループは 980 台の製造を担当している．

筑波大学グループは，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．プログラムと自動制御系は筑波大学が担当し，実際の製造は現在外部委託している．図 21 は組み立て精度の内，最も達成が難しい表裏のセンサー重心のずれをモジュール数でヒストグラムにしたものである. 目標値の 5 $\mu$m を達成できている．

前述の複数のサイトで現在建設中であるが，我々のシステムは最も安定して位置精度の優れたモジュールを製造できることを証明してきた．そのため当初の予定数 600 台を越えた建設を依頼されている．全数の量産終了は 2004 年 10 月を予定している．

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のプログラムは筑波大学のグループで整備し，実際の測定は，当初は岡山大グループらと分担し，現在は外部委託している．

シリコンセンサーは製造過程で暗電流が増加する場合があり，極端に大きな暗電流はノイズの原因となる．これは傷等により局所的に高電場が発生するためで，マイクロ放電とよんでいる. この暗電流は時間経過により電場が安定すると減少するが，実際に 24 時間測定をしてこれら異常モジュールが実際に安定することを確かめた (図 22)．また，発生個所からの発光を冷却 CCD カメラで捕らえることで，暗電流の要因を同定した．原因が製造過程で発生にある場合は，フィードバックし，この結果，異常モジュール発生頻度を 9%程度に抑え，しかも多くは使用上問題のない程度であることを示した. 仕様を満たすモジュール割合は 95% で，この割合は他の製造サイトと比較すると 極めて優れている．

モジュールの電気的試験はチップに内蔵されたテストパルスを用いるものであるが，これに加えて各チャンネルにレーザー信号を入れ，直接信号を測定する試験を行った．この試験によりセンサーやテストパルス系自体に起因する問題を含めて総合的な評価ができる．判定された不良チャンネルは，電気試験結果とほとんど一致し，電気試験の正当性が結論できた．一方で，電気試験によるボンディングの判定ミス，テストパルス系自体の問題，センサー電極の切断個所など新たな不良もいくつか判明した．

モジュールはカーボンハニカムでできたバレル状のシリンダーにねじ止め設置されるが，

モジュールを安全にねじ穴位置まで移動し，ねじ止めするロボットアームのプログラム開発を完了した．特にトラブル発生時に安全に待避できるようにハードを含めた調整を行った．ロボットは据え付け作業をするオックスフォード大学に納品された．

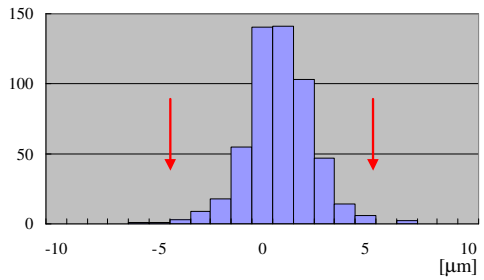


図 21: 表裏のセンサー重心のずれの分布 ( モジュール数 ) .

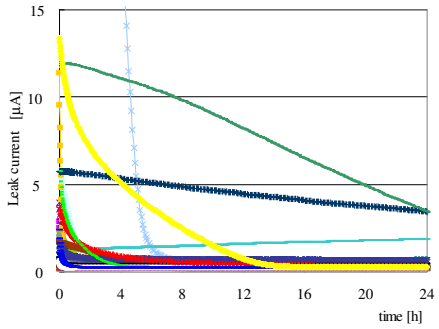


図 22: マイクロ放電モジュールの 24 時間暗電流変化．

### (2) ヒッグス粒子検出の評価

ATLAS 実験において，ヒッグス粒子を発見するために最も有効なのは，$H \to Z^0 Z^{*0} \to \ell^+\ell^-\ell^+\ell^-$ で発生する 4 つの荷電レプトン (電子またはμ 粒子) を用いて質量を再構成することである．ただし，ヒッグス粒子の質量が 140 GeV/$c^2$ 以下の場合は，2 つの $Z$ 粒子への分岐比が減少するため，別のいくつかのモードを用いて探索する必要がある．

従来から評価されてきたグルーオンから重いクォークループを介して発生する機構に加えて，$W/Z$ ボソンの対衝突からヒッグスが発生する機構を評価した．ヒッグスの質量が小さいこの領域では生成断面積はあまり大きくないが，W/Z ボソンの生成に伴うエネルギーの高いジェットが前方に発生し，カラー交換の無い中央部にはヒッグスからの信号以外ジェットがないという特徴がある．$H \to \gamma\gamma$，$H \to WW \to \ell\nu jj$，$H \to Z^0 Z^{*0} \to \ell^+\ell^-\ell^+\ell^-$ での発見能力を評価した．

従来，すべての質量域においてヒッグス粒子を発見するためには 3 年かかると考えられてきたが，これらを含めると実験開始 1 年で発見できる．

## 【3】 GLC 実験

電子・陽電子衝突型線形加速器は，トップクォーク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エネルギーフロンティアの加速器であり，日本をはじめとしたアジア地域では 2003 年に GLC 計画という名称に変更してその実現を目指している．GLC 加速器は，ビーム輝度 $2.5 \times 10^{34}$ cm$^{-2}$ s$^{-1}$，1 TeV 以上の重心系エネルギーが達成可能であることを基本設計値として要求しており，その中心に来る衝突点には最低一つの検出器が置かれる．GLC 計画では現在，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) GLC 用カロリメータ

筑波大学グループは，KEK などのグループと共同で GLC 検出器用のカロリメータを開発している．GLC 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である．そのためには，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にすることが不可欠である．それにより，カロリメータ内でジェットを構成するの個々の粒子の識別して，荷電粒子に対して優れた分解能を持つ飛跡検出器の情報も組み合わせた高精度でのエネルギー測定が可能となる．

カロリメータは，奥行き方向で電磁カロリメータとハドロンカロリメータに分けられるが，GLC では両方共に鉛とシンチレーターを交互に組み合わせたサンプリングカロリメータを基本設計としている．この検出器では，シンチレーター中にはめ込まれた波長変換ファイバーにより伝達された光が，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ー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．

本年度は，昨年度に引続き電磁カロリメータのハードウェアによる研究を重点的に行なった．昨年度製作した細分割電磁カロリメータのテスト・モジュール ( 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ーを 20 枚ずつ縦・横に並べたもの ) を用いてビームテストを行ない，収集したデータを解析して性能を評価した．ビームテストは，2004 年 3 月に昨年度と同じ KEK の PS において，1 ~ 4 GeV/$c$ の電子・μ ・π 粒子を使用して行なわれ，高統計のデータを得ることができた．現在まだ解析が進行中であるが，電子に対するエネルギー分解能や応答線形性は，それぞれ $13.4\%/\sqrt{E}+0.0\%$ ( $E$(GeV) は入射電子のエネルギー ) および 1% 以内とほぼ期待通りの性能が出ていることを確認した．入射電子に対する位置分解能測定では，4 GeV の電子に対する各読みだし層 ( 縦，横 ) での結果として図 23 に示した性能を得た．さらに応答の位置依存性に関して，カロリメータの一番上流の読みだし層におけるπ 粒子に対する応答として良い一様性を得た ( 図 24 ) . 今後，複数の粒子が入射した場合の分離能力や，クラスタの再構成の研究をシミュレーションも併せて行なう予定である．

また，上記以外の研究として，ハドロンシャワーの奥行き方向の揺らぎに関する研究や，シミュレーションによるジェット再構成のアルゴリズムの開発も同時に進めている．

## 参考文献


[1] "Search for the flavor-changing neutral current decay $D^0 \to \mu^+\mu^-$ in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV",
D. Acosta *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. D **68**, 091101(R) (2003).

[2] "Measurement of Prompt Charm Meson Production Cross Sections in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV",
D. Acosta *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **91**, 241804 (2003).

[3] S. Tsuno, "Tests of Enhanced Leading Order QCD in $W$ Boson plus Jet Production in 1.96-TeV Proton-Antiproton Collisions", Ph.D. Thesis, University of Tsukuba, January 2004.

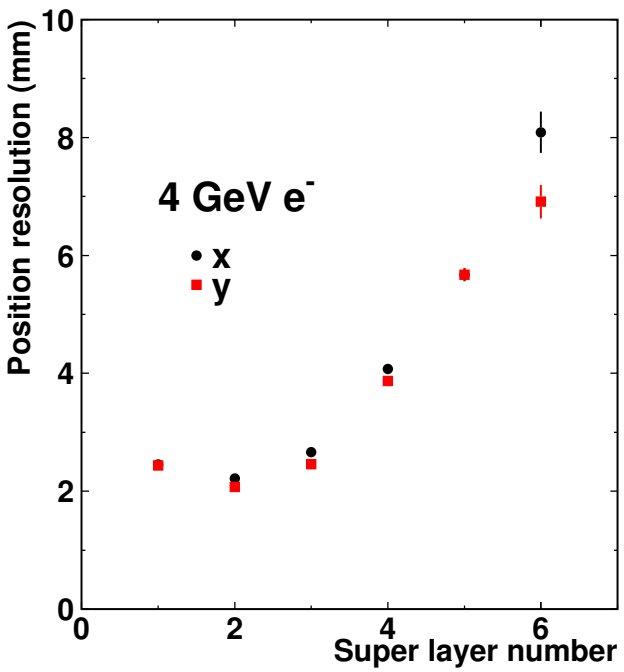


図 23: 4 GeV の電子を入射した時の各読み出し層での位置分解能．電磁シャワーが最大になる第 2 層で最小の分解能 ( 2 mm ) を得た．

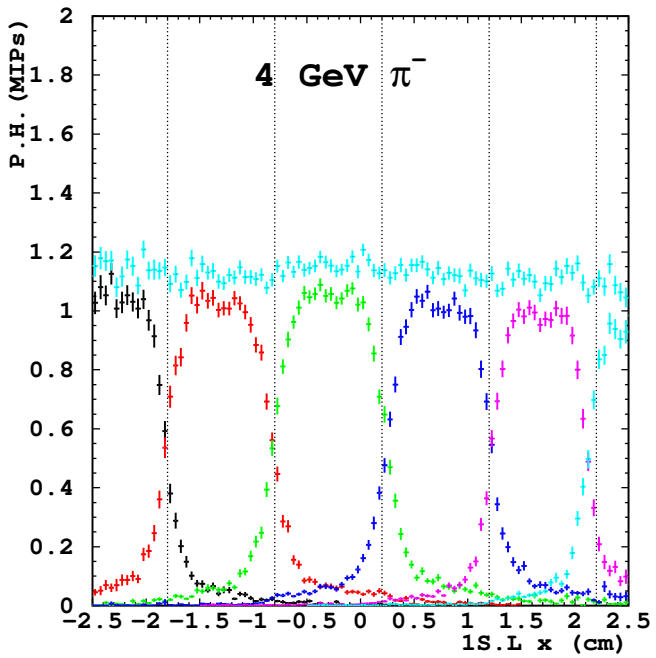


図 24: 入射π 粒子に対するストリップ横方向での応答の位置依存性 ( 最上流の読み出し層 ) . 各ストリップにおける応答とその和がプロットされている．

## 【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：145,000 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 (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 (2) 61,300 千円

## 【5】　研究発表

### (1)　学会誌等への発表論文

1. "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, Phys. Rev. Lett. **90**, 081802 (2003).

2. "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, Phys. Rev. Lett. **90**, 131801 (2003).

3. "Search for Associated Production of $\Upsilon$ and Vector Boson in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV",
   D. Acosta *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **90**, 221803 (2003).

4. "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, Phys. Rev. Lett. **90**, 251801 (2003).

5. "Central Pseudorapidity Gaps in Events with a Leading Antiproton at the Fermilab Tevatron $\bar{p}p$ Collider",
   D. Acosta *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **91**, 011802 (2003).

6. "Search for Lepton Flavor Violating Decays of a Heavy Neutral Particle in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV",
   D. Acosta *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **91**, 171602 (2003).

7. "Measurement of Prompt Charm Meson Production Cross Sections in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV",
   D. Acosta *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **91**, 241804 (2003).

8. "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, Phys. Rev. D **68**, 012003 (2003).

9. "Measurement of the mass difference $m(D_s^+) - m(D^+)$ at CDF II",
D. Acosta *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. D **68**, 072004 (2003).

10. "Search for the flavor-changing neutral current decay $D^0 \to \mu^+\mu^-$ in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV",
D. Acosta *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. D **68**, 091101(R) (2003).

11. "Search for Pair Production of Scalar Top Quarks in $R$-parity Violating Decay Modes in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV",
D. Acosta *et al.*, The CDF Collaboration, FERMILAB-PUB-03/070-E. Submitted to Phys. Rev. Lett. May 7, 2003.

12. "Search for Kaluza-Klein Graviton Emission in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV using the Missing Energy Signature",
D. Acosta *et al.*, The CDF Collaboration, FERMILAB-PUB-03/285-E. Submitted to Phys. Rev. Lett. September 15, 2003.

13. "Measurement of the average time-integrated mixing probability of $b$-flavored hadrons produced at the Tevatron",
D. Acosta *et al.*, The CDF Collaboration, FERMILAB-PUB-03/327-E. Submitted to Phys. Rev. D September 8, 2003.

14. "Measurement of the polar-angle distribution of leptons from $W$ boson decay as a function of the $W$ transverse momentum in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV",
D. Acosta *et al.*, The CDF Collaboration, FERMILAB-PUB-03/381-E. Submitted to Phys. Rev. D November 21, 2003.

15. "Inclusive Double Pomeron Exchange at the Fermilab Tevatron $\bar{p}p$ Collider",
D. Acosta *et al.*, The CDF Collaboration, FERMILAB-PUB-03/043-E. Submitted to Phys. Rev. Lett. November 5, 2003.

16. "Combination of CDF and DØ Results on $W$ Boson Mass and Width",
The CDF and DØ Collaborations, FERMILAB-PUB-03/398-E. Submitted to Phys. Rev. D November 21, 2003.

17. "Optimized search for single-top-quark production at the Tevatron",
D. Acosta *et al.*, The CDF Collaboration, FERMILAB-PUB-03/388-E. Submitted to Phys. Rev. D November 24, 2003.

18. "Observation of the Narrow State $X(3872) \to J/\psi\pi^+\pi^-$ in $\bar{p}p$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV",
D. Acosta *et al.*, The CDF Collaboration, FERMILAB-PUB-03/393-E. Submitted to Phys. Rev. Lett. December 4, 2003.

19. “Construction of the ATLAS Semi-conductor Tracker (SCT) Barrel Modules in Japan”,
Y. Kato, K. Hara *et al.*, Nucl. Instrum. Methods **A511**, 132-135 (2003).

20. “The CDF Run IIb Silicon Detector”,
M. Aoki, K. Hara, S. Kim *et al.*, The CDF Collaboration, Nucl. Instrum. Methods **A518**, 270-276 (2004).

## (2) 学会・研究会での講演 ( 国内 )

1. 千石 大樹：ロボットを用いた ATLAS SCT バレルモジュール設置法の開発，
日本物理学会 ( 2003 年 9 月 9 日 ), 宮崎ワールドコンベンションセンター・サミット.

2. 原 和彦：Nd:YAG レーザーによるアトラス SCT モジュール検査法の開発，
日本物理学会 ( 2003 年 9 月 9 日 ), 宮崎ワールドコンベンションセンター・サミット.

3. 吉玉 仁：CDF 実験用高放射線耐性シリコン飛跡検出器の研究,
日本物理学会 ( 2003 年 9 月 9 日 ), 宮崎ワールドコンベンションセンター・サミット.

4. 松永 浩之：CDF Runll 実験の現状報告 2:トップの物理，新粒子探索，QCD，
日本物理学会 ( 2003 年 9 月 10 日 ), 宮崎ワールドコンベンションセンター・サミット.

5. 津野 総司 : テバトロン ，CDF 実験における $W$ ボソンに伴うジェット生成過程の QCD 物理学の研究，
日本物理学会 ( 2003 年 9 月 10 日 ), 宮崎ワールドコンベンションセンター・サミット.

6. 佐藤 構二：CDF Run II におけるトップ クォークの質量測定，
日本物理学会 ( 2003 年 9 月 11 日 ), 宮崎ワールドコンベンションセンター・サミット.

7. 永野 あい : リニアコライダーストリップ・ファイバー電磁カロリメータのビームテスト報告 1 – エネルギー分解能，応答一様性，位置分解能– ，
日本物理学会 ( 2003 年 9 月 12 日 ), 宮崎ワールドコンベンションセンター・サミット .

8. 山内 伸 : リニアコライダー実験用ストリップ・ファイバー電磁カロリメータのビームテスト報告 2 – マルチアノード光電子増倍管の性能評価– ，
日本物理学会 ( 2003 年 9 月 12 日 ), 宮崎ワールドコンベンションセンター・サミット .

9. 山本 澄江 : リニアコライダーカロリメータのシミュレーションによる分割の最適化，
日本物理学会 ( 2003 年 9 月 12 日 ), 宮崎ワールドコンベンションセンター・サミット .

10. 松本 偉史 : リニアコライダーカロリメータのビームテスト結果によるシャワー発達の研究，
日本物理学会 ( 2003 年 9 月 12 日 ), 宮崎ワールドコンベンションセンター・サミット .

11. 鈴木 隆史：CDF での荷電ヒグス粒子の探索，
広島ヒグス研究会 ( 2004 年 1 月 19–20 日 ), 広島大学.

12. 小林 博和：$WH \to WWW \to$ like sign dilepton analysis at CDF RunII，
広島ヒグス研究会 ( 2004 年 1 月 19–20 日 ), 広島大学.

13. 桑野 太郎：$H \to ZZ$ in Vector Boson Fusion at ATLAS，
広島ヒグス研究会（2004 年 1 月 19–20 日），広島大学.

14. 受川 史彦：CDF 実験の現状，
科研費特定領域「質量起源と超対称性物理の研究」第 2 回研究会（2004 年 3 月 8 – 9 日），つくば国際会議場エポカル．

15. 津野 総司：CDF Run-II 実験での $W$+jet 随伴生成の測定と QCD の検証，
科研費特定領域「質量起源と超対称性物理の研究」第 2 回研究会（2004 年 3 月 8 – 9 日），つくば国際会議場エポカル．

16. 小林 博和：CDF RUNII での 同一電荷を持ったダイレプトン事象による Higgs 粒子探索，
日本物理学会（2004 年 3 月 27 日），九州大学.

17. 千石 大樹：LHC 計画アトラス実験における $VV \to H \to WW \to \ell\nu jj$ チャンネルによるヒッグス粒子探索，
日本物理学会（2004 年 3 月 27 日），九州大学.

18. 魚住 聖：CDF Run2 におけるセミレプトニック崩壊を用いた B 中間子の寿命測定，
日本物理学会（2004 年 3 月 27 日），九州大学.

19. 木村 直樹：CDFII 実験，TOF 測定器に用いるファイン メッシュ型光電子増倍管の性能評価 V，
日本物理学会（2004 年 3 月 27 日），九州大学.

20. 武内 勇司：陽子・反陽子衝突実験でのトップクォーク対生成におけるスピン偏極度相関の測定，
日本物理学会（2004 年 3 月 30 日），九州大学.

21. 津野 総司：ハドロンコライダーにおけるイベント生成プログラムの紹介，
日本物理学会（2004 年 3 月 30 日），九州大学.

22. 桑野 太郎：LHC 計画 ATLAS 実験における SCT モジュールの性能検査報告，
日本物理学会（2004 年 3 月 30 日），九州大学.

23. 皆川真実子：Nd:YAG レーザーによるアトラス SCT モジュール検査報告，
日本物理学会（2004 年 3 月 30 日），九州大学.

### (3) 国際会議・研究会での講演

1. Satoru Uozumi, “Measurement of the B Meson Lifetimes using Semileptonic Decays in CDF Run2”,
April Meeting of the Americal Physical Society, Philadelphia, Pennsylvania, USA, April 5 – 8, 2003.

2. Soushi Tsuno, “Studies of $W$+ Jets and Prompt Diphoton Production with the CDF Detector”,

EPS, International Europhysics Conference on High Energy Physics, Archen, Germany, July 17 – 23, 2003.

3. Fumihiko Ukegawa, "B Physics at CDF",
   3rd International Workshop on B Physics and CP Violation, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, September 29 – October 1, 2003.

4. Shinhong Kim, "B Physics at CDF",
   2nd International Conference on Flavor Physics, Korea Institute for Advanced Study, Seoul, Korea, October 6 – 11, 2003.

5. Kazuhiko Hara, "Sensors for the CDF Run2b Silicon Dector",
   IEEE 2003 Nuclear Science Symposium (NSS) and Medical Imaging Conference (MIC), Portland, Oregon, USA, October 19 – 24, 2003.

6. Hiroyuki Matsunaga, "Performance of Strip-Array EM Calorimeter",
   Inter-regional tele-meeting on LC Calorimetry, Montpellier, France (via phone), November 12, 2003.

7. Kazuhiko Hara, "Beam splash simulation with 1-W YAG laser",
   Workshop on ATLAS Semiconductor Tracker (SCT), CERN, Switzerland, December 1 – 5, 2003.

8. Hiroyuki Matsunaga, "Study of Scintillator-based EM Calorimeter",
   The 6th ACFA Workshop on Physics and Detector at Linear Collider, Tata Institute of Fundamental Research, Mumbai, India, December 15 – 17, 2003.

9. Fumihiko Ukegawa, "Results from the CDF Experiment at Tevatron Run II",
   KEK Theory Meeting 2004 "Particle Physics Phenomenology" KEK, Tsukuba, Japan, March 1 – 3, 2004.

## (4) 会議・研究会報告書

1. 受川 史彦：CDF は走ってます！,
   基研研究会「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，
   素粒子論研究 第 107 巻第 3 号，2003 年 6 月．

## (5) 学位論文

博士論文

1. 津野 総司 : Tests of Enhanced Leading Order QCD in $W$ Boson plus Jet Production in 1.96-TeV Proton-Antiproton Collisions
   ( 1.96 TeV 陽子反陽子衝突による W ボソン随伴ジェット生成の摂動論的量子色力学の検証 )，
   筑波大学物理学研究科，2004 年 1 月．

修士論文

1. 松本 偉史：ハドロンシャワーの奥行き方向の揺らぎの解析とそのシミュレーション，
   筑波大学数理物質科学研究科，2004 年 2 月．
2. 皆川 真実子：ATLAS 実験用 SCT バレルモジュールのレーザーによる性能評価，
   筑波大学数理物質科学研究科，2004 年 2 月．
3. 恵本 健亮：GEANT4 を用いた ATLAS SCT 用シリコン飛跡検出器の位置分解能評価，
   筑波大学理工学研究科，2004 年 2 月．
4. 千石 大樹：ATLAS SCT バレルモジュール設置ロボットの開発研究筑波大学理工学研究科，2003 年 2 月．
5. 山本 澄江：リニアコライダー実験におけるジェット再構成の研究，
   筑波大学理工学研究科，2003 年 2 月．

卒業論文

1. 中村 浩二：CDF 実験中央部プリシャワー検出器に用いるマルチアノード光電子増倍管の特性研究，
   筑波大学第一学群自然学類，2004 年 2 月．
2. 中村 雄一：CDF 実験 SVXIIb 用シリコン飛跡検出器の性能評価，
   筑波大学第一学群自然学類，2004 年 2 月．

### (6)　研究会の主催

1. 科学研究費特定領域「質量起源と超対称性物理の研究」 第 2 回研究会
   つくば国際会議場エポカル，2004 年 3 月 8 – 9 日．
2. CDF 実験日本グループ研究会
   筑波大学物理学系，2003 年 12 月 12 – 13 日．

## 【構成員の異動】

1. 2003 年 6 月に戸村友宣助手が着任．
2. 2003 年 10 月に清矢良浩講師が大阪市立大学助教授へ転出．