II．素粒子実験グループ

教　授	金　信弘，受川 史彦
講　師	原　和彦，丸山 和純，武内 勇司
助　手	戸村 友宣
研究科特別研究員	魚住 聖
科研費研究員	三宅 秀樹
大学院生	14 名
学群 4 年次生	4 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 ILC に参加している．CDF は現在進行中，ATLAS は建設中，ILC は検討中の実験である．本年度もそれぞれにおいて様々な研究活動が行われた．また，本年度より，ニュートリノ崩壊の探索を目的とした高分解能光検出器の開発を開始した．

【1】　陽子・反陽子衝突実験 CDF

CDF 実験は，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・反陽子衝突実験であり，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．1996 年の物理実験 Run I の終了後 CDF 検出器およびテバトロン加速器の増強を経て，2001 年度より Run IIa 実験が開始された．

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，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．テバトロン加速器の瞬間ルミノシティはこれまでに，最高値 $\mathcal{L} = 2.9 \times 10^{32}\ \mathrm{cm}^{-2}\ \mathrm{s}^{-1}$ が達成されており，設計値 $10^{32}\ \mathrm{cm}^{-2}\ \mathrm{s}^{-1}$ を突破している．また，週毎の積分ルミノシティも最大で $40\ \mathrm{pb}^{-1}$ 程度， 全積分ルミノシティは $2900\ \mathrm{pb}^{-1}$ に達している．CDF 検出器により記録されたデータ量は約 $2400\ \mathrm{pb}^{-1}$ である．Run II 実験は，2009 年まで継続され，最終的には 5 - $9\ \mathrm{fb}^{-1}$ 相当の衝突事象の収集が見込まれている．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 II 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．

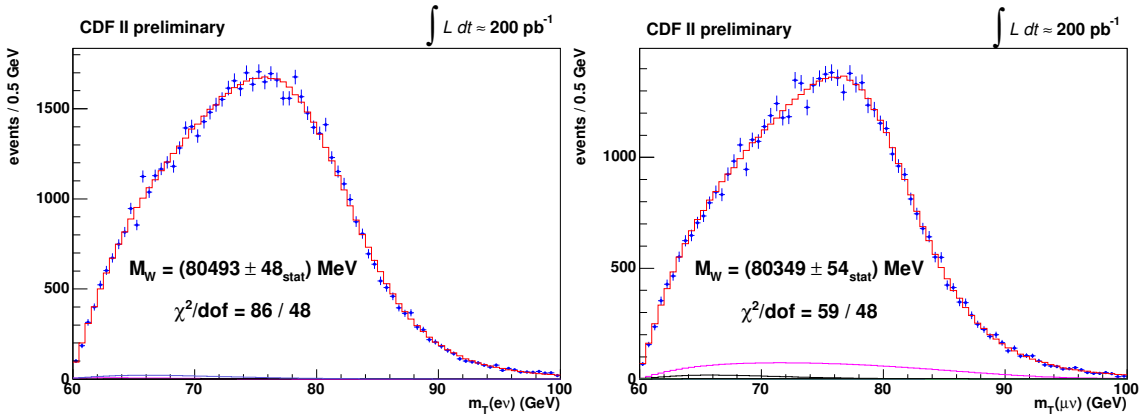

図 1: W ボソンの質量測定．$W^{\pm} \to e^{\pm}\nu$（左）および $\mu^{\pm}\nu$（右）候補事象の横方向質量の分布を示す．Run-II 実験で得られた $200\ \mathrm{pb}^{-1}$ のデータを用いている．

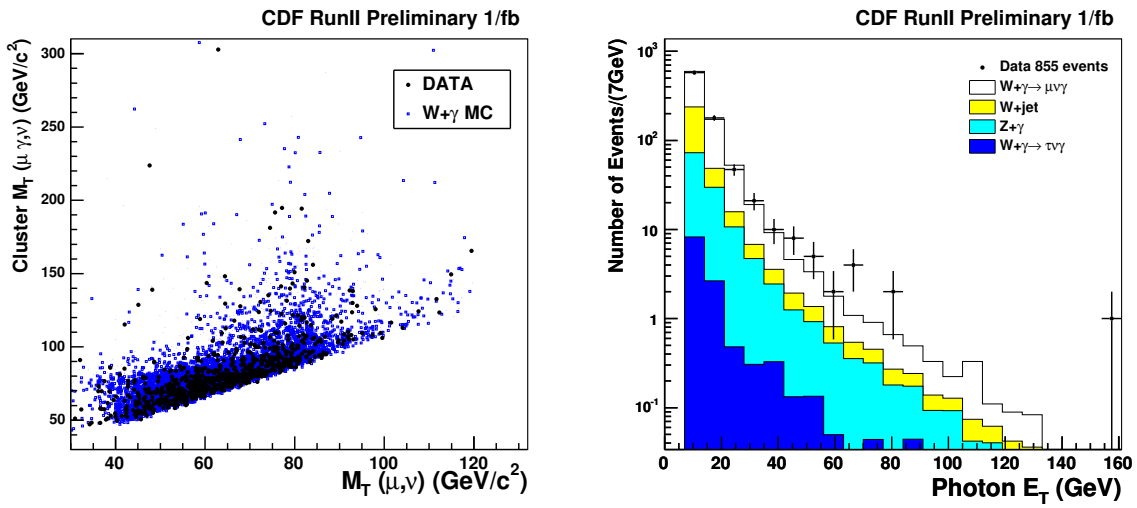

図 2: $W^{\pm}$ ボソンと光子の随伴生成の測定．候補事象の（左）レプトン-ニュートリノ-光子 3 体系の横方向質量と（右）光子の横運動量の分布．

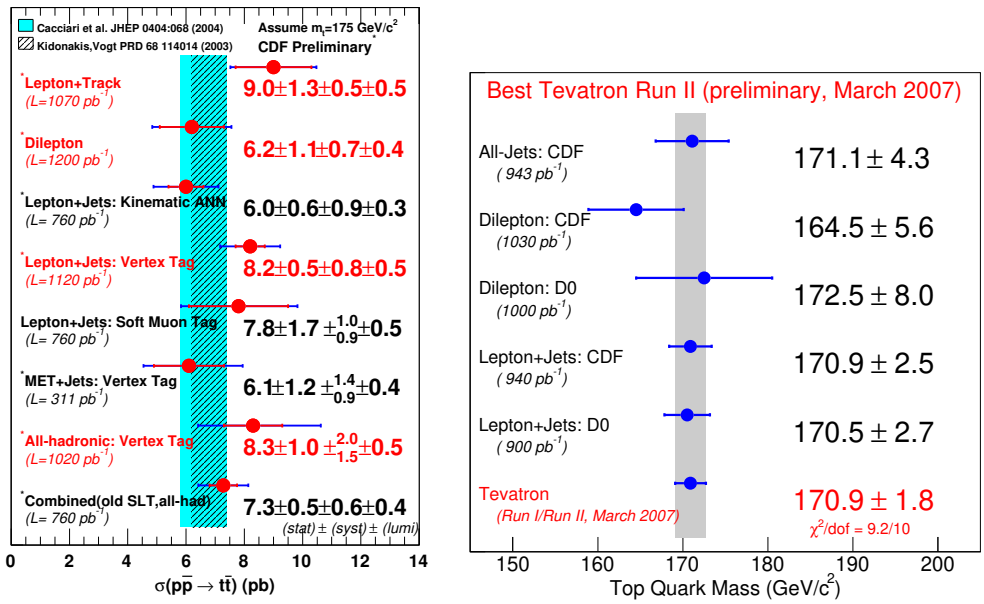

図 3: 左：トップクォーク対生成断面積の測定．右：トップクォークの質量の測定．

(1)　電弱相互作用の物理

電弱相互作用について 2006 年度の最重要結果は，W ボソンの質量の測定である．これは Run-II 実験における最初の測定である．図 1 にレプトンと消失運動量の系の横方向質量の分布を示す．質量は $m_W = 80413 \pm 48\ \mathrm{MeV}/c^2$ と決定された．これは単一の測定として最も精度の高いものであり，世界平均値の精度は $\pm 25\ \mathrm{MeV}/c^2$ である．後述するように，W ボソンの質量とトップクォークの質量を総合するとヒッグス粒子の質量の間接的な測定が可能であり，有意な制限を与えている．

電弱統一理論は非可換ゲージ理論であり，ゲージボソン同士の自己結合を含む．ゲージボソンの対生成を測定することにより，統一理論の検証が可能となる．CDF 実験では，$W^\pm$ ボソンと Z^0 ボソンの随伴生成の初めての観測に成功した．生成断面積は $\sigma(\bar{p}p \to W^\pm Z^0 X) = 5.0^{+1.8}_{-1.6}\ \mathrm{pb}$ と測定され，標準理論の予言値 $3.7 \pm 0.3\ \mathrm{pb}$ と矛盾しない．$W^\pm$ ボソンと光子の随伴生成の研究も継続され，$1\ \mathrm{fb}^{-1}$ のデータを解析した結果，光子の横運動量 $7\ \mathrm{GeV}/c$ 以上の領域に 855 の候補事象が観測された．図 2 にレプトン-ニュートリノ-光子 3 体系の横方向質量と光子の横運動量の分布を示す．いずれも期待されるものとよい一致を示している．生成断面積は $\sigma(\bar{p}p \to W\gamma X) \cdot \mathcal{B}(W \to \ell\nu) = 19.11 \pm 1.04 \pm 2.40 \pm 1.11\ \mathrm{pb}$ であり，理論値 $19.3 \pm 0.4\ \mathrm{pb}$ とよく一致する．

(2)　トップクォークの物理

CDF 実験による 1995 年のトップクォーク発見以来 10 年が経過し，Run II 実験においては高統計のトップクォーク事象を用いて，その様々な性質がより詳細に研究されている．テバトロンでのトップクォーク生成は，クォーク・反クォーク衝突を素過程とする対生成が主である．その生成断面積は多くの終状態を用いて測定されている．トップクォークの崩壊で生じた W ボソンが両方ともレプトン対に崩壊する dilepton チャンネルにおいては，$1.07\ \mathrm{fb}^{-1}$ 相当の

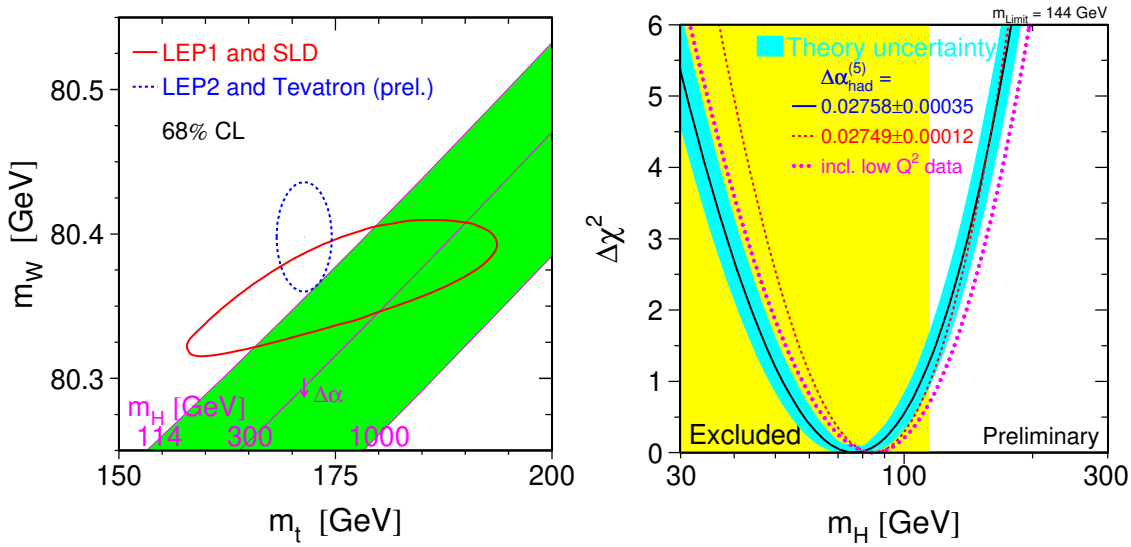

図 4: W ボソンとトップクォークの質量の測定とヒッグス粒子の質量に対する制限．

データを用いて $\sigma_{t\bar{t}}(\text{dilepton}) = 9.0 \pm 1.3 \pm 0.5 \pm 0.5$ pb という新しい結果を得た．W ボソンが共に $q\bar{q}'$ 対に崩壊する all-hadronic チャンネルでは，$\sigma_{t\bar{t}}(\text{dilepton}) = 8.3 \pm 1.0\,^{+2.0}_{-1.5} \pm 0.5$ pb を得ている．図 3(左) は，CDF 実験により現在までに得られた断面積の測定結果をまとめたものである．すべての終状態を総合すると，$\sigma_{t\bar{t}} = 7.3 \pm 0.5\,(\text{stat}) \pm 0.6\,(\text{syst}) \pm 0.4\,(\text{lum})$ pb を得る．測定結果は理論予想を良く支持している．

トップクォークの質量の測定では，lepton+jet チャンネルにおいて $M_{\text{top}} = 170.9 \pm 1.6\,(\text{stat}) \pm 2.0\,(\text{syst})$ GeV/c^2 という結果が得られた．この測定は，単一の測定結果としては，もっとも精度の高いものである．トップクォーク質量の最新の測定結果をまとめたものを図 3 (右) に示す．すべての測定の平均値は $M_{\text{top}} = 170.9 \pm 1.8$ GeV/c^2 である．トップクォークの質量と W ボソンの質量を共に測定することにより，ヒッグス粒子の質量に対する制限を得る．図 4 にこれを示す．ヒッグス粒子の質量について $M_{\text{Higgs}} = 80\,^{+36}_{-26}$ GeV/c^2 (68%CL) および $M_{\text{Higgs}} < 153$ GeV/c^2 (95%CL) が与えられている．

その他，現在進行中の解析に，dilepton チャンネルを用いたトップクォーク対生成機構の解明およびスピン偏極度相関の測定などがある．

(3) B 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 Run-II 実験では，Silicon Vertex Trigger (SVT) と呼ばれる装置を導入した結果，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効率よく収集することが可能となった．

CDF Run II 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．B_q^0 中間子 ($q \equiv d,\ s$) の粒子・反粒子振動の角振動数 Δm_q は小林・益川行列の要素 $|V_{tq}|$ と関連しており，前者の測定により後者を決定することができる．これまでに Δm_d は精度よく測定されているが，$|V_{td}|$ の決定は理論的不定性により約 20%に制限されている．B_s^0 中間子の粒子・反粒子振動が観測されれば B_d^0 中間子の振動数 Δm_d との比を取ることにより，比 $|V_{td}/V_{ts}|$ を精度よく決定できる．これは，小

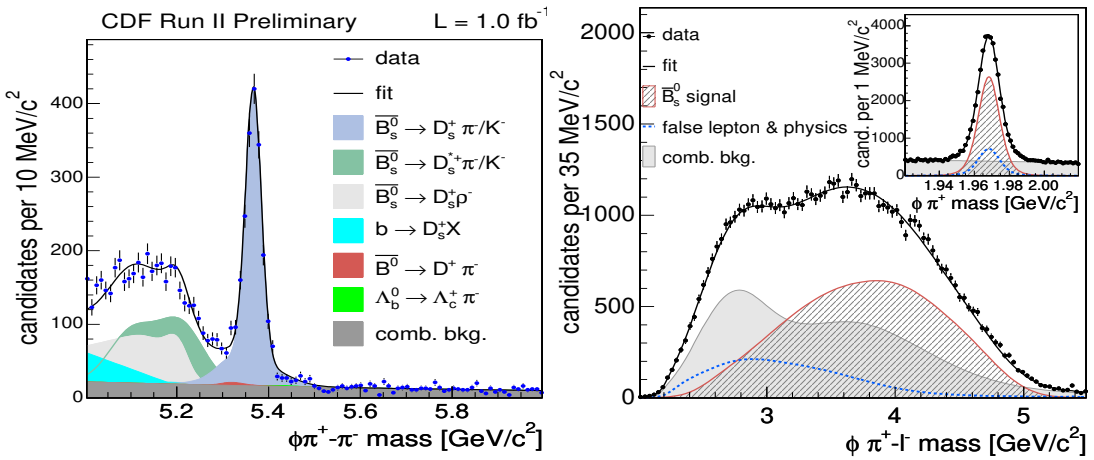

図 5: $\bar{B}^0_s$ 中間子の信号．左：$\bar{B}^0_s \to D^+_s \pi^-$，右：$\bar{B}^0_s \to \ell^- \bar{\nu} D^+_s X$．

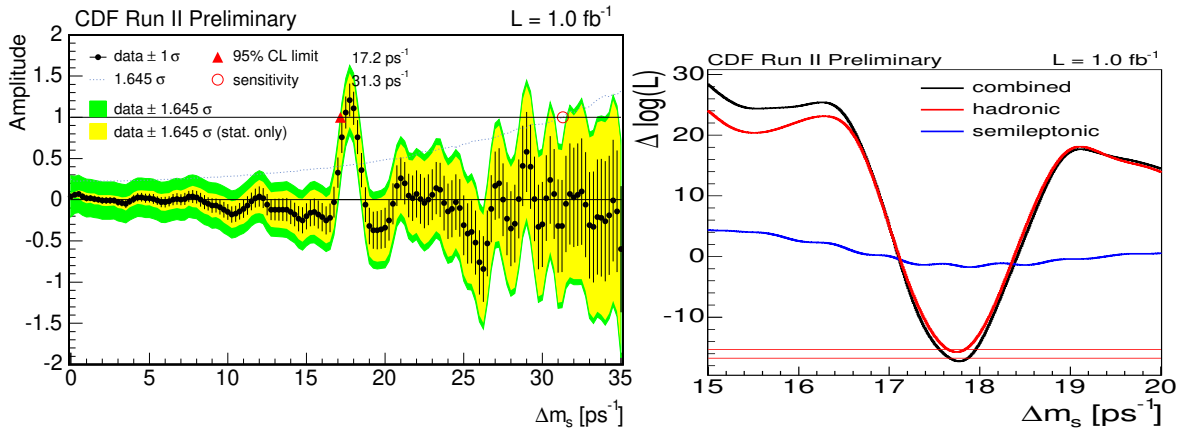

図 6: $B^0_s \bar{B}^0_s$ 振動の探索．振動の振幅（左）および尤度（右）を振動数 Δm_s の関数として表したもの．

林・益川行列のユニタリ三角形の右の斜辺の長さに対応している．

$B^0_s \bar{B}^0_s$ 系では予想される振動数 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 5 左）．分岐比の大きいセミレプトニック崩壊 $\bar{B}^0_s \to \ell^- \bar{\nu} D^+_s X$ も用いられている（同右）．積分輝度はおよそ 1 fb^{-1} である．これらの事象を用いて，振動のフーリエ振幅解析を行なったものが，図 6 左である．振動の振幅を，仮定した振動数 Δm_s の関数として表している．また，図 6 右に尤度の分布を示す．感度 31.3 ps^{-1} に対して振動数 18 ps^{-1} 付近に振動を示唆する構造が見られた．背景事象の揺らぎによりこのような現象の生じる確率は 8×10^{-8} 以下と評価された．これは正規分布の 5σ 以上に相当し，$B^0_s \bar{B}^0_s$ 振動は確立した．尤度分布より，振動数は $\Delta m_s = 17.77 \pm 0.10 \pm 0.07$ ps^{-1} と決定された．また，小林・益川行列の要素に対して $|V_{td}/V_{ts}| = 0.2060 \pm 0.0007 \,^{+\,0.0081}_{-\,0.0060}$ を得た．この結果，ユニタリ三角形の右の斜辺の長さの決定の精度が大きく向上した．

$B^0_s \bar{B}^0_s$ 振動の観測は，それに同期した CP 対称性の破れの研究の道を開く．例えば，$B^0_s \to$

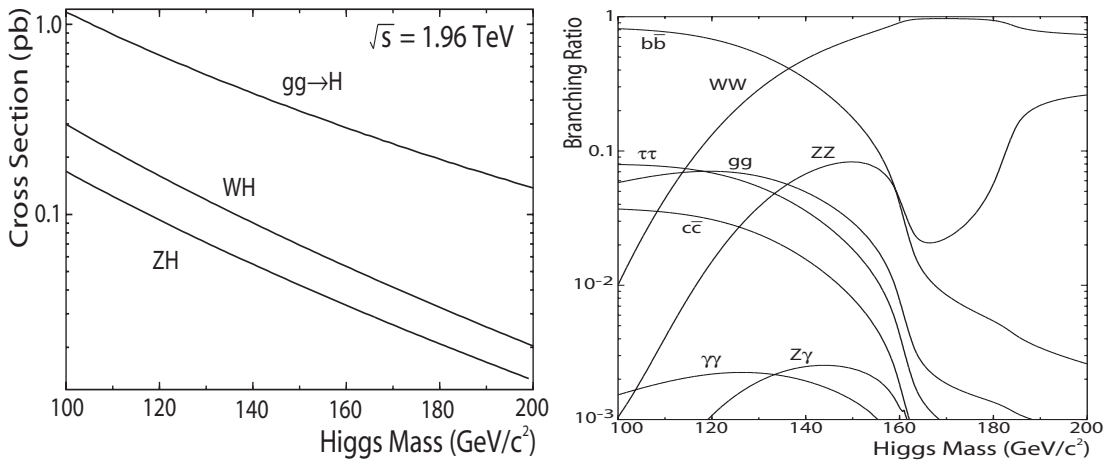

図 7: 左：テバトロンでの標準模型ヒッグス粒子の生成断面積をヒッグス粒子の質量の関数として表したもの．異なる素過程の寄与を別々に示してある．右：標準模型ヒッグス粒子の崩壊分岐比をヒッグス粒子の質量の関数として表したもの．

$J/\psi\,\phi$ 崩壊での CP 非対称度測定が ± 0.2 程度の精度で行われると期待され，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．

(a)　新粒子の探索

ヒッグス粒子の探索が種々の過程を用いてなされた．テバトロンでのヒッグス粒子の生成断面積とその崩壊分岐比を図 7 に示す．質量が軽い場合 (およそ $120\ \mathrm{GeV}/c^2$ 以下) は $H \to b\bar{b}$ 崩壊がほとんどであり，重い場合には弱ゲージボソン対 W^+W^- および Z^0Z^0 への崩壊が主なものとなる．

生成率は，素過程 $gg \to H$ による単一生成が一番高いが，ヒッグス粒子が軽い場合には $p\bar{p} \to b\bar{b}X$ 過程によるバックグラウンド中に信号を見出すのはほぼ不可能である．よって，弱ゲージボソン $W^{\pm}$ (あるいは Z^0) との随伴生成 $p\bar{p} \to HWX \to b\bar{b}\ell\nu X$ を用いる．終状態は，高運動量のレプトンと消失運動量 (あるいはレプトン対) と $b\bar{b}$ クォーク対となる．b クォーク起源のジェットを，トップクォーク探索時と同様に，二次崩壊点の存在を要求して同定する．主なバックグラウンドは，QCD 過程による W 粒子と $b\bar{b}$ の随伴生成である．図 8 (左) に $b\bar{b}$ 候補対の質量分布を示す．

中間質量領域 ($140\ \mathrm{GeV}/c^2$ 程度) では，$H \to W^+W^{(*)-}$ 崩壊が寄与し始める．W ボソンとの随伴生成では，終状態に W ボソンが 3 個存在し，そのうちの二つは必ず同電荷を持つ．それらがレプトンに崩壊すれば，同符号のレプトン対という特徴的な信号となる．

高質量領域では，W^+W^- への崩壊が主になるが，この終状態はバックグラウンドが少なく，単一生成 $p\bar{p} \to HX$ の探索が可能である．終状態は，二つの高運動量レプトンと大きな損失運動量となる．

これらの過程を用いてヒッグス粒子による寄与を探索したが，いずれも既知のバックグラウンドによるものと矛盾しない．よって，ヒッグス粒子生成に対する上限を設定した．図 8 (右) にこれらの上限値の標準模型による予言値に対する比を示す．実験値は予言値の十倍程度であり，さらなるデータ量の増加が必要である．

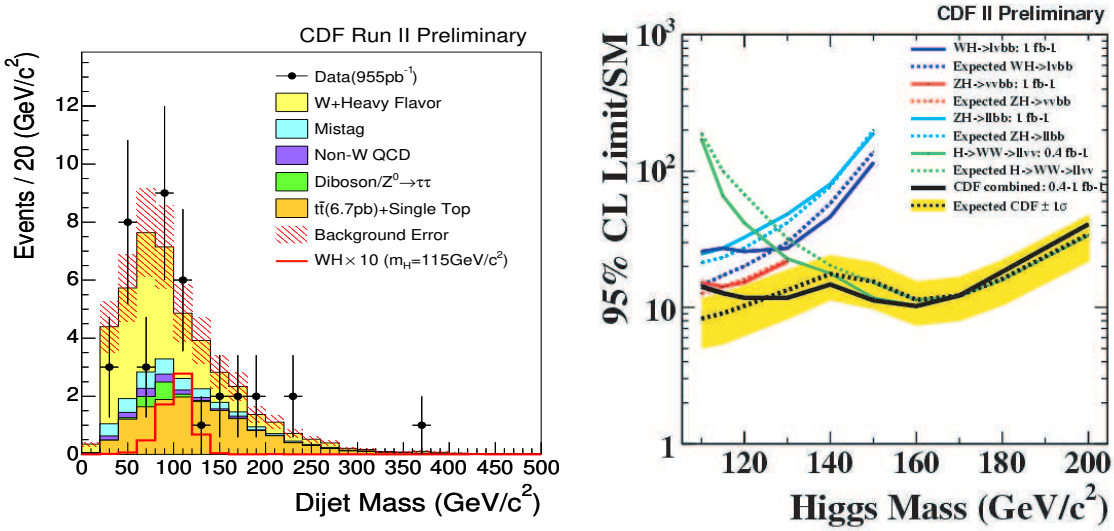

図 8: （左）$\bar{p}p \to WHX \to \ell\nu b\bar{b}X$ 過程によるヒッグス粒子の探索．二次崩壊点を用いて同定した $b\bar{b}$ ジェット対の質量分布（右）標準模型ヒッグス粒子探索の結果．生成断面積の上限値の理論値に対する比を質量の関数として示したもの．

以上は CDF Run II 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．最終的に $5-9$ fb^{-1} 相当のデータを蓄積する予定であり，素粒子物理学に対し多大な貢献をすると期待される．

【2】 LHC ATLAS 実験

欧州セルン研究所の陽子・陽子衝突型加速器 LHC（Large Hadron Collider，重心系エネルギー 14 TeV）は，質量の起源とされるヒッグス粒子の研究を主目的とした加速器で，現在，2008 年からの本実験にむけて建設最終段階の調整が進んでいる．筑波大学グループは LHC の ATLAS 実験グループに属し，中央部シリコン飛跡検出器の建設を担当してきた．他の検出器要素も大半が地下の衝突点に設置済みで，ATLAS 検出器全体の最終調整も進んでいる．

(1) シリコン飛跡検出器（SCT）

筑波大学のグループは KEK のグループらと協力して，シリコン飛跡検出器（SCT）バレル部モジュールの建設を行ってきた．バレル部は全 4 層のシリンダーで構成されるが，これらはセルンで組み上げられ，ATLAS 本体への設置の前に £ n 上で宇宙線を用いた調整試験をした．SCT の外周に位置する遷移輻射型飛跡検出器（TRT）とともに宇宙線を捉え，飛跡を再構成し，SCT モジュールの検出効率や位置分解能を評価した．図 9 は 実際に試験を行った 468 モジュール分の検出効率を設置場所ごとに示したもので，すべて 99%以上の値を示している．これらはモンテカルロによる評価と比較し，ほぼ予定通りの性能が得られていることが確認できた．

現在までにバレル部 SCT は地下に移設され，冷却関連の調整を行っている．その後に，他

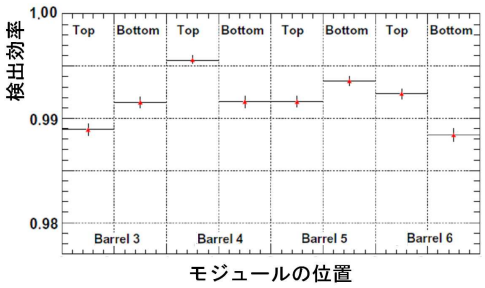

図 9: 宇宙線によるバレル部 SCT モジュールの検出効率の評価．宇宙線通過方向によりモジュールを上下にグループ分けして各 4 層の平均効率を示している．予想値とほぼ等しい結果が得られ，正常に機能していることを確認した．

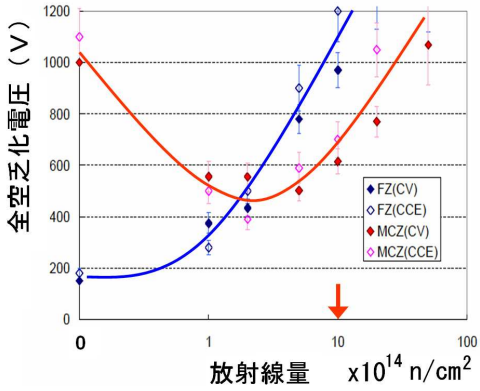

図 10: 全空乏化電圧の FZ (約 200V から単調に増加) と MCZ (1kV から一旦減少してから増加) の放射線量依存性の比較．矢印 1×10^{15} n/cm^2 が sLHC で予想される放射線量．

の検出器とともに総合的な運転をし，宇宙線を用いた調整を行う予定である．平成 20 年初頭から 14 TeV での衝突実験を開始する．

(2) sLHC 用シリコン検出器の開発

LHC の輝度は，開始 3 年ほどで設計値 1×10^{34} cm^{-2} s^{-1} に達する予定である．その後，2015 年あたりを目処に輝度をさらに 10 倍に増強する sLHC (super LHC) 計画が現在検討されている．現行の SCT + TRT の飛跡検出器は，sLHC では電極が長過ぎでヒット頻度の観点からも運転できない．そのため，新しい飛跡検出器の設計検討を開始した．

p 型ウェハーを用いた n 電極読み出しセンサーが放射線耐性の点で有望であるが，高抵抗 p 型ウェハーの安定したプロセスの経験が不足している．そこで FZ や MCZ 法による p 型ウェハーを用いてテストセンサーを製作し放射線試験を行った． 読み出し電極の電気分離や全空乏化電圧の変化の点から MCZ ウェハーが有利でほぼ要望を満たすことが分かった．図 10 は全空乏化電圧の放射線量依存性を示す．MCZ の変化が小さいのはウェハー中の酸素濃度が高いことが原因と考えられる．

電極長の細分化により sLHC ではモジュール数が増えるが，ケーブル用スペースが限られているため，複数モジュールを直列接続し電源供給することが有効となる．レギュレータを用いた電源供給システムを試作し現行のモジュールを用いてノイズの変化を評価した．

SOI (Silicon on Insulator) は CMOS の後継として 2000 年ごろから実用化され始め，高速性や低消費電力が特長とされる．沖電気の 0.15 μm SOI プロセスにより，トランジスタとピクセルを KEK のグループらと製作した．トランジスタには陽子線を照射し，その特性変化を測定した．酸化膜中のホールの形成により CMOS よりも放射線量依存性が顕著であるが，裏面に電圧を加えることで特性を回復できることが分かった．

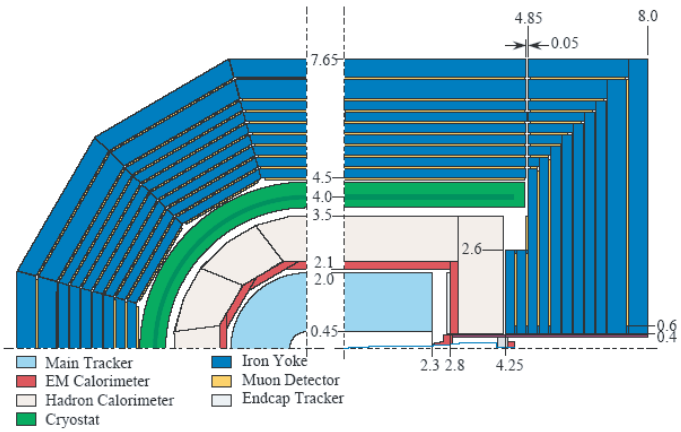

図 11: ILC(GLD) 検出器の構造．ビーム軸に対して垂直 (左) 又は平行 (右) 面での断面図．

【3】　ILC 実験

次世代のエネルギーフロンティアにおける素粒子実験を遂行するため，重心系エネルギー 0.5 ~ 1 TeV の電子・陽電子衝突型線形加速器を建設する計画が提案されている．国際協力により進められているこの計画は ILC 計画と名付けられ，精力的に加速器や測定器の研究・開発が行われている．ILC での実験では，素粒子である電子を衝突に用いるので，加速したエネルギーを効率良く衝突に使用することができ，またバックグラウンドの少ない環境での精密測定や新粒子探索が可能となる．

現在筑波大学グループでは，KEK，神戸大，信州大，新潟大等と共同で，ILC 実験において使用される検出器 (図 11) のうち，カロリメータ (エネルギー測定器) の研究開発を行なっている．現在計画されている ILC カロリメータでは，シンチレータと鉛板を積層構造にしたサンプリングタイプと呼ばれるものが用いられている．ILC 実験では，ゲージボソンやトップクォーク，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り，そのために ILC 実験では，ジェットに対するエネルギー測定精度をより向上させるため，Particle Flow Algorithm と呼ばれるジェット再構成/エネルギー測定方法が提唱されている．この方法では，ジェット中の粒子をカロリメータ中で一つ一つ区別し，中性粒子についてはカロリメータでエネルギーを測定し，荷電粒子の運動量については，より優れた分解能を持つ飛跡検出器で測定することにより，ジェットに対するエネルギー分解能の向上を図るものである．このような方法を用いるには，カロリメータは単一の入射粒子に対する優れたエネルギー分解能に加え，非常に細かいセルに分割された構造を有することが要求される．我々は，このような細分割を実現するために，図 12 のように，シンチレータを短冊 (ストリップ) 型にし，交差させて交互に積み重ねる方法を採用した．昨年度においては，このような構造を持ったカロリメータのテストモジュールの電子，パイ中間子等のビームによって得られたデータの解析を行った．シミュレーションを用いて，カロリメータのセル (分割) サイズの最適化，その際の性能等の評価も行った．

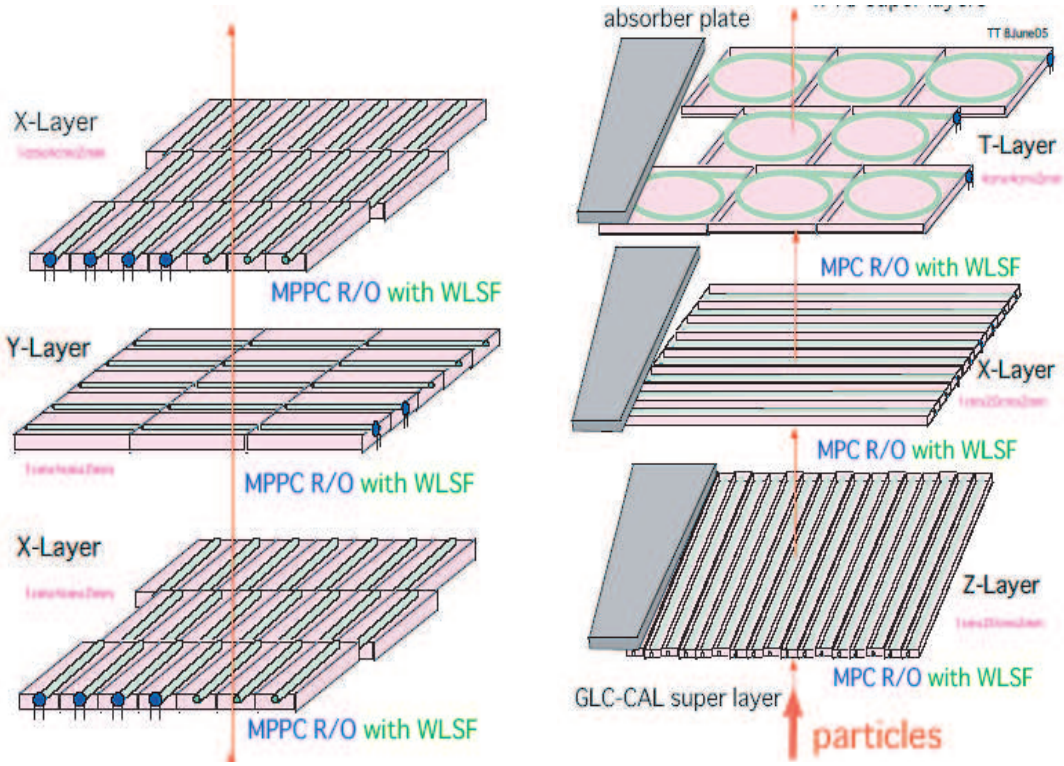

図 12: カロリメータの概略．左は電磁カロリメータ，右はハドロンカロリメータの構造を示す．

(1)　光信号読み出し MPPC の開発

今年度においては，カロリメータの光信号読み出しのための，新型光センサーの研究開発を行った．ILC カロリメータでは，非常に細かいセル構造が要求されるため，読み出しのために膨大な数の光センサーが必要となる．また，磁場中で使用されることもあり，これまで広く用いられてきた光センサーである光電子増倍管の使用は難しい．このため，ILC カロリメータでは，新しいタイプの半導体光センサーである MPPC (Multi Pixel Photon Counter) を採用する予定である．MPPC は，小さく低コストで磁場の影響を受けないため，ILC カロリメータの読み出しには最適である．我々は，MPPC の実用化を予定している浜松ホトニクス，また高エネルギー加速器研究機構を中心とした光センサーグループと共に，ILC カロリメータでの使用を目指して MPPC の研究開発を行ってきた．

今年度は 1600 ピクセルの 1 mm× 1 mm の MPPC の基本的な性能評価を行った．光検出効率，応答線形性，増幅率，ノイズ頻度，クロストークの測定を行い，それぞれ要求性能をほぼ満たすことがわかった．今後，信号頻度依存性，長期安定性，放射線耐性のテストを行う予定である．

【4】　超伝導体赤外線検出器の開発

過去 10 年間に超伝導トンネル接合素子 STJ (Superconducting Tunnel Junction) を用いた光検出器の開発研究が世界でひろく行われてきた．これは超伝導体が半導体と比較してはるかに小さいエネルギーバンドギャップを有することを利用して，半導体検出器などの既存

の光検出器に比べてエネルギー分解能がはるかに高い光検出器を原理的に実現できることが強い動機となっている．このことから，高エネルギー分解能のＸ線検出器や赤外線検出器への応用を目指して開発が進められてきた．

本開発研究では，遠赤外線 ($E_\gamma \sim$ 数 10 meV) のエネルギーを一光子ごとに数%の精度で測定するために，従来用いられている Nb (3.1 meV)，Al (0.34 meV) よりもさらにエネルギーバンドギャップの小さい Hf (0.051 meV，$T_c = 0.165$ K) あるいは W (0.0049 meV，$T_c = 0.016$ K) を超伝導素材として用いた超伝導体検出器の開発を目指す．これまで困難であった赤外線領域の一光子分光を目指した STJ を開発する．本研究では，Hf や W といった，より転移温度が低い超伝導体の使用を計画しているため，10 mK 程度の極低温での安定した運転を妨げる問題を解決しなければならない．

2007 年 1 月より KEK 測定器開発室のプログラムの一つとして筑波大学，KEK，理研の共同研究によって，この STJ 開発が進められてきた．この開発研究では，これまでの超伝導体検出器の開発において問題となっていることを解決しつつ，新しい超伝導体素材である Hf あるいは W を用いた超伝導体検出器の開発を行っている．現在までに，ガス圧力・放電パワー等の条件を変えながら，Hf 成膜 (スパッタリング) を行うことによって成幕条件決定のための基本データの収集が行われた．このデータを解析することによって，歪みが起きず，かつ，表面粗さの小さい Hf の STJ 素子製作条件が得られた．今後 4 年あまりの期間に 20 mm 角程度の Hf，W という超伝導素材を用いた超伝導体検出器実証モデルを開発する．

この検出器はニュートリノ崩壊探索実験に用いることを目的として開発されてきた．ニュートリノがディラック粒子であるならば，標準模型の枠内で重いニュートリノ (ν_3) は軽いニュートリノ (ν_2) と光子に寿命約 10^{36} 年で崩壊する．また右巻き weak boson W_R が存在する場合には，このニュートリノの寿命ははるかに短くなる．現在の W_R の質量下限および W_R と W_L の混合角の上限を用いるとニュートリノの寿命は最小で 10^{17} 年程度となる．我々はニュートリノの崩壊で生成する光子のエネルギースペクトルを測定することによってニュートリノ崩壊を観測することを目指す．このような長寿命のニュートリノの崩壊を観測するには，非常に多くのニュートリノが必要であるので，宇宙背景ニュートリノを用いる．その崩壊で生成される遠赤外線光子のエネルギースペクトルが高い端 (~ 30 meV) で急に落ちることが崩壊の信号となる．今年度はこの宇宙背景ニュートリノの輻射崩壊のシミュレーションを行った結果，検出器は 30 meV の光子に対して 2 ~ 3%のエネルギー分解能を有することが要求されることがわかった．

今後，過去 10 年間開発の進められている超伝導体検出器技術をさらに発展させて，遠赤外線領域で一光子ごとに数%の分解能でエネルギーを測定できる検出器の実現を目指す．この検出器はニュートリノ崩壊探索，宇宙赤外線背景輻射の観測などの素粒子実験，宇宙観測のみならずさまざまな分野における実用にも供する．

【5】　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：70,000 千円，旅費：20,000 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の成果とりまとめ」
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)
3,000 千円

3. 科学研究費補助金 「陽子反陽子衝突実験 CDF によるトップとボトム・フレーバーの物理」
共同研究 (研究代表者： 金 信弘) 特定領域研究 25,600 千円

【6】 研究発表

(1) 学会誌等への発表論文

1. "Search for neutral MSSM Higgs bosons decaying to tau pairs in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,"
A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **96**, 011802 (2006).

2. "Precision top quark mass measurement in the lepton + jets topology in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,"
A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **96**, 022004 (2006).

3. "Search for charged Higgs bosons from top quark decays in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,"
A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **96**, 042003 (2006).

4. "Search for H to $b\bar{b}$ produced in association with W bosons in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,"
A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **96**, 081803 (2006).

5. "Evidence for the exclusive decay $B_c^{\pm} \to J/\psi\pi^{\pm}$ and measurement of the mass of the B_c meson,"
A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **96**, 082002 (2006).

6. "Measurement of the dipion mass spectrum in $X(3872) \to J/\psi\pi^+\pi^-$ decays,"
A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **96**, 102002 (2006).

7. "Measurement of the inclusive jet cross section using the k_T algorithm in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,"
A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **96**, 122001 (2006).

8. "Top quark mass measurement from dilepton events at CDF II,"
A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **96**, 152002 (2006).

9. "A search for scalar bottom quarks from gluino decays in $\bar{p}p$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,"
A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **96**, 171802 (2006).

10. "Measurement of the ratios of branching fractions $B(B_s^0 \to D_s^- \pi^+)/B(B^0 \to D^- \pi^+)$ and $B(B^+ \to \overline{D}^0 \pi^+)/B(B^0 \to D^- \pi^+)$,"
A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **96**, 191801 (2006).

11. "Direct search for Dirac magnetic monopoles in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,"
A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **96**, 201801 (2006).

12. "Measurement of the $t\bar{t}$ production cross section in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV using missing E_T + jets events with secondary vertex b-tagging,"
A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **96**, 202002 (2006).

13. "Search for $Z' \to e^+e^-$ using dielectron mass and angular distribution,"
A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **96**, 211801 (2006).

14. "Search for high-mass resonances decaying to e μ in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,"
A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **96**, 211802 (2006).

15. "Measurement of b hadron masses in exclusive J/ψ decays with the CDF detector,"
D. Acosta *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **96**, 202001 (2006).

16. "Observation of $B_s^0 \to \psi(2S)\phi$ and measurement of ratio of branching fractions $B(B_s^0 \to \psi(2S)\phi)/B(B_s^0 \to J/\psi\phi)$,"
A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **96**, 231801 (2006).

17. "Measurement of the B_c^+ meson lifetime using $B_c^+ \to J/\psi + e^+ + \nu_e$,"
A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **97**, 012002 (2006).

18. "Search for new physics in lepton + photon + X events with 305 pb^{-1} of $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,"
A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **97**, 031801 (2006).

19. "Measurement of the B_s^0 – $\bar{B}_s^0$ oscillation frequency,"
A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **97**, 062003 (2006).

20. "Search for a neutral Higgs boson decaying to a W boson pair in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s}$ = 1.96 TeV,"
A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **97**, 081802 (2006).

21. "Measurement of the $t\bar{t}$ production cross section in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,"
A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **97**, 082004 (2006).

22. "Search for large extra dimensions in the production of jets and missing transverse energy in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,"
A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **97**, 171802 (2006).

23. "Search for excited and exotic muons in the $\mu\gamma$ decay channel in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s}$ = 1.96 TeV,"
A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **97**, 191802 (2006).

24. "Observation of $B_s^0 \to K^+K^-$ and measurements of branching fractions of charmless two-body decays of B^0 and B_s^0 mesons in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,"
A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **97**, 211802 (2006).

25. "Observation of $B_s^0 - \bar{B}_s^0$ oscillations,"
A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **97**, 242003 (2006).

26. "A search for $t \to \tau\nu q$ in $t\bar{t}$ production,"
A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Lett. B **639**, 172 (2006).

27. "Top quark mass measurement using the template method in the lepton + jets channel at CDF II,"
A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. D **73**, 032003 (2006).

28. "Search for anomalous semileptonic decay of heavy flavor hadrons produced in association with a W boson at CDF II,"
A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. D **73**, 051101 (2006).

29. "Search for second-generation scalar leptoquarks in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,"
A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. D **73**, 051102 (2006).

30. "Measurement of mass and width of the excited charmed meson states D_1^0 and D_2^{*0},"
A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. D **73**, 051104 (2006).

31. "Measurement of the top quark mass with the dynamical likelihood method using lepton plus jets events with b-tags in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,"
A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. D **73**, 092002 (2006).

32. "Measurement of the helicity of W bosons in top-quark decays,"
A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. D **73**, 111103 (2006).

33. "Measurement of the top quark mass using template methods on dilepton events in proton antiproton collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,"
A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. D **73**, 112006 (2006).

34. "Measurement of the ratio of branching fractions $B(D^0 \to K^+\pi^-)/B(D^0 \to K^-\pi^+)$ using the CDF II detector,"
A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. D **74**, 031109 (2006).

35. "Measurement of the b jet cross section in events with a Z boson in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,"
A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. D **74**, 032008 (2006).

36. "Top quark mass measurement from dilepton events at CDF II with the matrix-element method,"
A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. D **74**, 032009 (2006).

37. "Measurement of the inclusive jet cross section in $p\bar{p}$ interactions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV using a cone-based jet algorithm,"
A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. D **74**, 071103 (2006).

38. "Measurement of the $t\bar{t}$ production cross section in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV in the all hadronic decay mode,"
A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration Phys. Rev. D **74**, 072005 (2006).

39. "Measurement of the $t\bar{t}$ production cross section in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV using lepton + jets events with jet probability b-tagging,"
A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. D **74**, 072006 (2006).

40. "Measurement of the Ratios of Branching Fractions $\mathrm{B}(D_s^0 \to D_s^- \pi^+ \pi^+ \pi^-)/\mathrm{B}(B^0 \to D^- \pi^+ \pi^+ \pi^-)$ and $\mathrm{B}(B_s^0 \to D_s^- \pi^+)/\mathrm{B}(B^0 \to D^- \pi^+)$,"
A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **98**, 061802 (2007).

41. "Search for V + A Current in Top Quark Decay in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,"
A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **98**, 072001 (2007).

42. "Observation of Exclusive Electron-Positron Production in Hadron-Hadron Collisions,"
A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **98**, 112001 (2007).

43. "Measurement of the Λ_b^0 lifetime in $\Lambda_b^0 \to J/\psi \Lambda^0$ in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,"
A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **98**, 122001 (2007).

44. "Search for anomalous production of multi-lepton events in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,"
A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **98**, 131804 (2007).

45. "Measurement of the Top-Quark Mass in All-Hadronic Decays in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,"
A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **98**, 142001 (2007).

46. "Measurement of the B^+ production cross section in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1960$-GeV,"
A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. D **75**, 012010 (2007).

47. "Precision Measurement of the Top Quark Mass from Dilepton Events at CDF II,"
A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. D **75**, 031105 (2007).

48. "Search for Exotic $S = -2$ Baryons in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,"
A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. D **75**, 032003 (2007).

49. "Search for a $W^{'}$ Boson Decaying to an Electron-Neutrino Pair in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,"
A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, hep-ex/0611022, Submitted to Phys. Rev. Lett. November 3, 2006

50. "Measurement of the Helicity Fractions of W Bosons from Top Quark Decays using Fully Reconstructed $t\bar{t}$ Events with CDF II,"
A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, Submitted to Phys. Rev. D December 11, 2006

51. "Measurement of the Ratio of Branching Fractions B($B^+ \to J/\psi\pi^+$)/$B(B^+ \to J/\psi K^+$)," A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, Submitted to Phys. Rev. D January 24, 2007

52. "Cross Section Measurements of High-p_T Dilepton Final-State Processes Using a Global Fitting Method," A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, FERMILAB-PUB-06-486-E, Submitted to Phys. Rev. D(R) December 18, 2006

53. "Analysis of the Quantum Numbers J^{PC} of the X(3872)," A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, FERMILAB-PUB-06-485-E Submitted to Phys. Rev. Lett. December 18, 2006

54. "Measurement of the Top Quark Mass in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV using the Decay Length Technique," A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, FERMILAB-PUB-06-487-E, Submitted to Phys. Rev. D December 23, 2006

55. "Measurement of sigma($p\bar{p} \to Z$)·B($Z \to \tau\tau$) in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV," A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, Submitted to Phys. Rev. D January 28, 2007

56. "Measurement of the Inclusive Jet Cross Section using the k_T Algorithm in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV with the CDF II Detector," A. Abulencia *et al.*, The CDF Collaboration, FERMILAB-PUB-07-026-E, Submitted to Phys. Rev. Lett. January 27, 2007

57. "The CDF Run IIb Silicon Detector: Design, preproduction, and performance," T. Akimoto *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A **556**, 459 (2006).

58. "The CDF Run IIb Silicon Detector: Design, preproduction, and performance", T. Akimoto, K . Hara, S. Kim *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A **556**, 459–481 (2006).

59. "Performance of irradiated n^+-on-p silicon microstrip sensors", K . Hara *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A **565**, 543–550 (2006).

60. "The Barrel Modules of the ATLAS SemiConductor Tracker", A. Abdesselam, K . Hara *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A **568**, 642–671 (2006).

61. "Robotic mounting of ATLAS barrel SCT modules", R. B. Nickerson, K . Hara *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A **568**, 686–691 (2006).

62. "The ATLAS semiconductor tracker end-cap module", A. Abdesselam, K . Hara *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A **575**, 353–389 (2007).

63. B_s^0 中間子の粒子・反粒子振動の観測，
受川 史彦，魚住 聖，金 信弘，日本物理学会誌 **62**，249 (2007).

(2)　学会・研究会での講演（国内）

1. 受川 史彦：CDF 実験での B 粒子の物理，
科研費特定領域「フレーバー物理の新展開」第 1 回研究会（2007 年 3 月 16 – 17 日），
関西セミナーハウス，京都市左京区．

2. 武内 勇司：CDF のトップの物理，
科研費特定領域「フレーバー物理の新展開」第 1 回研究会（2007 年 3 月 16 – 17 日），
関西セミナーハウス，京都市左京区．

3. 秋元 崇：CDF でのレプトクォークの探索，
科研費特定領域「フレーバー物理の新展開」第 1 回研究会（2007 年 3 月 16 – 17 日），
関西セミナーハウス，京都市左京区．

4. 望月亜衣：Silicon On Insulator(SOI) 検出器におけるエレクトロニクスの放射線耐性の研究，
日本物理学会 2006 年春季大会（2007 年 3 月 25 – 28 日），首都大学東京.

5. 井上孝紀：SuperLHC-ATLAS 実験に用いる高放射線耐性シリコン飛跡検出器の開発研究，
日本物理学会 2006 年春季大会（2007 年 3 月 25 – 28 日），首都大学東京.

6. 永井義一：ATLAS 実験 宇宙線テストにおけるシリコン飛跡検出器の検出効率の評価，
日本物理学会 2006 年春季大会（2007 年 3 月 25 – 28 日），首都大学東京.

(3)　国際会議・研究会での講演

1. Fumihiko Ukegawa “Latest Results on B_s^0 Meson Particle-antiparticle Oscillations at CDF”,
KEK seminar, April 25, 2006.

2. Satoru Uozumi, “B masses and Lifetimes at the Tevatron”,
Hadron Collider Physics Symposium 2006, Duke University, Durham, North Carolina, USA, May 22 – 26, 2006.

3. Masato Aoki, “B_c results from CDF”,
Workshop on Heavy Quarkonium, BrookHaven Natinal Laboratory, Upton, New York, USA, June 27 – 30, 2006.

4. Kazuhiko Hara, “Systematic Study of the Microdischarge Characteristics of ATLAS Barrel Microstrip Modules”,
6th International “Hiroshima” Symposium on the Development and Application of Semiconductor Tracking Detectors, Carmel, California, USA, September 11 – 15, 2006.

5. Kazuhiko Hara, “On Biasing ATLAS Barrel Microstrip Modules”,
6th International ”Hiroshima” Symposium on the Development and Application of Semiconductor Tracking Detectors, Carmel, California, USA, September 11 – 15, 2006.

6. Ai Nagano, "Study of W-gamma Production at the Tevatron",
   Joint Meeting of Pacific Region Physics Communities, Honolulu, Hawaii, USA, October 29 – November 3, 2006.

7. Tatsuya Masubuchi, "Search for Technicolor particles in association with W boson at CDF",
   Joint Meeting of Pacific Region Physics Communities, Honolulu, Hawaii, USA, October 29 – November 3, 2006.

8. Yoshinori Yamada, "Long term stability test of PMTs used for TOF and endplug EM calorimeter of CDF Run-II experiment",
   Joint Meeting of Pacific Region Physics Communities, Honolulu, Hawaii, USA, October 29 – November 3, 2006.

9. Koki Inoue, "Upgrade of the ATLAS silion semiconductor tracker for the SLHC",
   Joint Meeting of Pacific Region Physics Communities, Honolulu, Hawaii, USA, October 29 – November 3, 2006.

10. Yoshikazu Nagai, "The Detector Performance Study for the Barrel Section of the ATLAS SemiConducter Tracker with Cosmic Rays",
    Joint Meeting of Pacific Region Physics Communities, Honolulu, Hawaii, USA, October 29 – November 3, 2006.

11. Kazuhiko Hara, "P-type Sensor Development and Irradiation",
    ATLAS High Luminosity Upgrade Tracker Workshop, Liverpool, United Kingdom, December 6 – 8, 2006.

(4) 会議・研究会報告書

1. "First Results of 0.15 μm CMOS SOI Pixel Detector",
   Y. Arai, K . Hara *et al.*, Proceedings of International Symposium on Detector Development for Particle, Astroparticle and Synchrotron Radiation Experiments (SNIC 2006), Menlo Park, California, USA, April 3 – 6, 2006.

2. "B masses and lifetimes at the Tevatron",
   S. Uozumi, The CDF Collaboration, FERMILAB-CONF-06-349-E. Proceedings of Symposium on Hadron Collider Physics 2006 (HCP 2006), Durham, North Carolina, USA, May 22 – 26, 2006.

3. "Real time secondary vertexing at CDF,"
   J. Adelman, T.Maruyama, M.Aoki *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A **569**, 111 (2006).

(5) 学位論文

博士論文

1. 秋元 崇：Search for Third Generation Vector Leptoquarks in 1.96-TeV Proton-Antiproton Collisions （1.96TeV 陽子反陽子衝突による第 3 世代ベクター・レプト

クォークの探索），
筑波大学大学院数理物質科学研究科，2007 年 2 月．

修士論文

筑波大学大学院数理物質科学研究科，2007 年 2 月．

1. 井上 孝紀：SuperLHC-ATLAS 実験に用いる高放射線耐性シリコン飛跡検出器の開発研究
2. 永井 義一：ATLAS 実験 SCT バレルシリコン飛跡検出器の宇宙線を用いた性能評価
3. 前田 高志 : リニアコライダー実験用カロリメータのための光検出器 MPPC の開発研究
4. 山田 佳範：CDF 実験粒子飛行時間測定器およびプラグ部カロリメータに用いられる光電子増倍管の長期安定性の研究

卒業論文

筑波大学第一学群自然学類，2007 年 2 月．

1. 須藤 裕司 : リニアコライダー実験用カロリーメータの読み出しに用いるマルチピクセル光検出器 MPPC の開発研究
2. 武政　健一：ニュートリノ崩壊の探索
3. 真鍋 希代嗣：Application of Serial Powering for ATLAS Barrel Semi-Conductor Tracker Modules
4. 目黒 立真：ATLAS SCT モジュールによる宇宙線飛跡の再構成

(6)　研究会の主催

1. CDF 実験日本グループ研究会
筑波大学，2006 年 12 月 23 – 24 日．

【構成員の異動】

1. 2006 年 10 月に魚住聖が信州大学物理科学科研究員に転任．
2. 2006 年 12 月に三宅秀樹が研究員として着任．