

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
研究科特別研究員	倉田 正和
科研費研究員	三宅 秀樹, 永野間 淳二, 戸村 友宣
大学院生	18 名
研究生	1 名
学群 4 年次生	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 ILC に参加している。CDF は現在進行中, ATLAS はまもなく稼働, ILC は検討設計中の実験である。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, 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行っている。

【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・大学からなる計 14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 II 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 II 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 $\mathcal{L} = 3.6 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ が達成されており (2008 年 12 月記録更新), 設計値 $10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を大きく上回っている。また, 週毎の積分ルミノシティも最大で 73 pb^{-1} 程度, 全積分ルミノシティは 6.5 fb^{-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 5.3 fb^{-1} である。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, 中央部プリシャワー検出器, およびデータ収集システムの建設・調整・運転を行ってきた。これらの検出器は順調に稼働しており, 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。

(1) 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後十年以上が経過し, 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, その様々な性質が詳細に研究されている。テバ

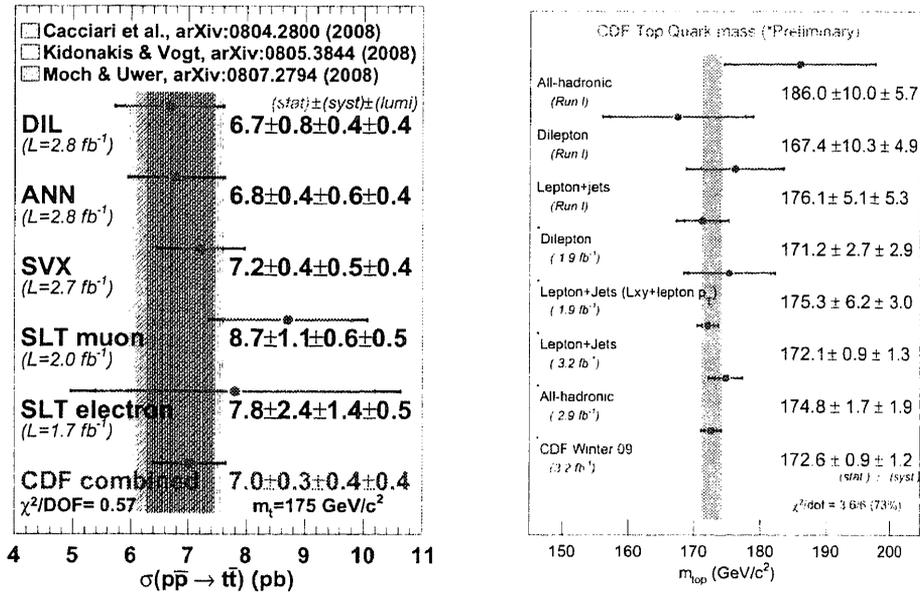


図 1: CDF 実験におけるトップクォークの対生成断面積 (左) および質量 (右) の測定一覧.

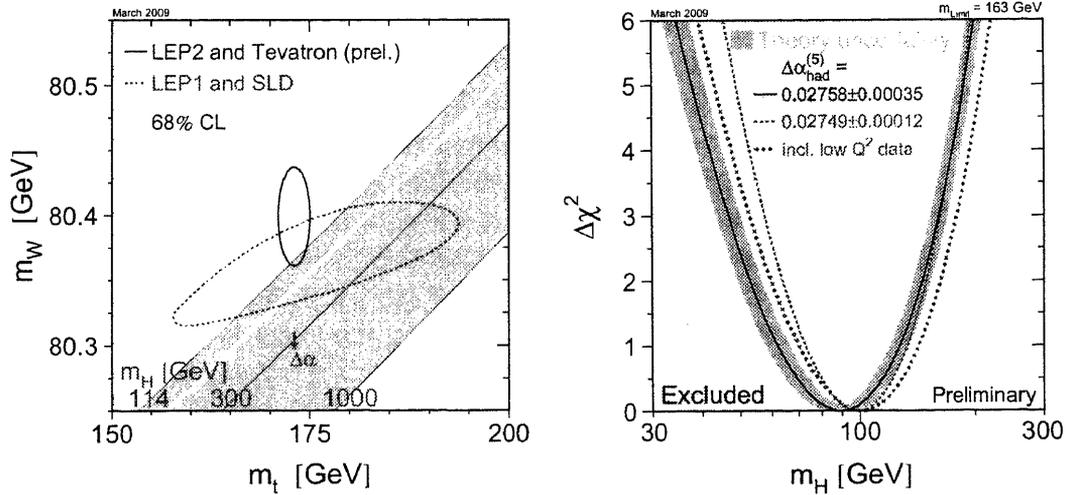


図 2: 左: W ボソンとトップクォークの質量の測定と, 右: ヒッグス粒子の質量に対する制限.

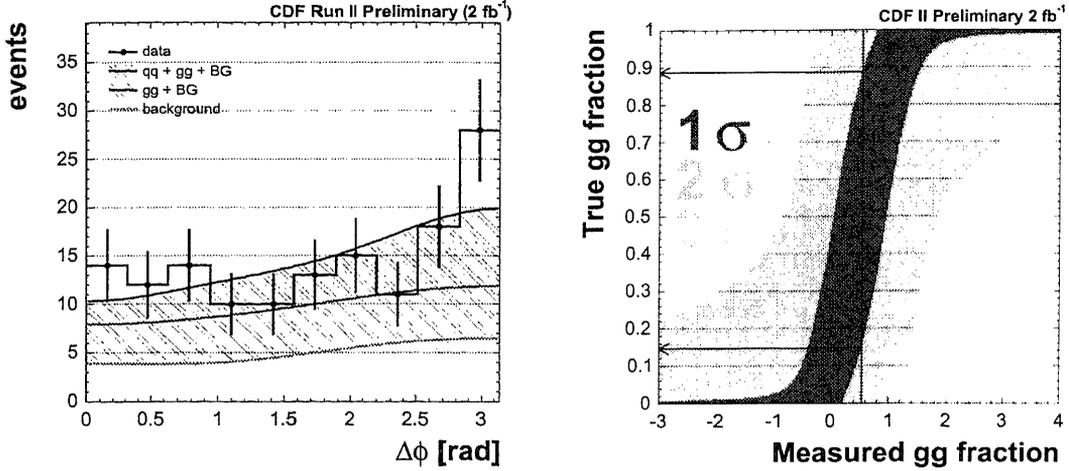


図 3: 左: $t\bar{t}$ 対生成における荷電レプトンの方位角の相関. 右: 測定された gg 素過程の割合と真の値に対する制限.

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 (図 1 左)。すべてのチャンネルを総合すると、 2.8 fb^{-1} 相当のデータを用いて $\sigma(\bar{p}p \rightarrow t\bar{t}X) = 7.0 \pm 0.3 \pm 0.4 \pm 0.4 \text{ pb}$ という結果を得た。これは、摂動論的 QCD による理論予言値とよく一致する。

質量の測定も同様に多くの終状態を用いて測定されている (図 1 右)。CDF 実験の平均値は $M_{\text{top}} = 172.6 \pm 0.9 \pm 1.2 \text{ GeV}/c^2$ であり、他実験も含むすべての測定の平均値は $173.1 \pm 0.6 \pm 1.1 \text{ GeV}/c^2$ である。トップクォークの質量と W ボソンの質量をとも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 2 にこれを示す。ヒッグス粒子の質量について $M_{\text{Higgs}} = 90^{+36}_{-27} \text{ GeV}/c^2$ (68% CL) および $M_{\text{Higgs}} < 163 \text{ GeV}/c^2$ (95% CL) を得た。

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とスピン偏極度相関の測定がある。トップクォーク対生成の素過程は、クォーク・反クォークを始状態とするものとグルオン・グルオンを始状態とするものがある。陽子のパートン分布関数から、テバトロンでの重心系エネルギー 1.96 TeV では、前者が 85%、後者が 15%との予言がなされる。この二つの素過程は、始状態粒子のスピンが異なるため、閾値近くの生成では $t\bar{t}$ 系の角運動量はそれぞれ $|1, \pm 1\rangle$ と $|0, 0\rangle$ となる。したがって、 t および \bar{t} も異なった角運動量状態にある。トップクォークは寿命が極めて短いため、ハドロン化前に崩壊し、そのスピン情報が失われることなく崩壊物 W および b に伝播される。よって、崩壊物 W および b を測定すると親粒子 t のスピン情報を得ることが可能である。特に、 W ボソンの崩壊で生じた荷電レプトン l の方向はトップクォークのスピン方向と強い相関を持つ。実験的には、 $t\bar{t}$ 対の dilepton チャンネルを用いてレプトンの飛翔方向のビーム軸周りの方位角 ϕ の相関を観測するのが容易である。図 3 に二つの素過程の方位角相関分布および観測された分布を示す。Feldman-Cousins 法を用いて gg 素過程の割合を $f_{gg} = 0.53^{+0.35+0.07}_{-0.37-0.08}$ と決定した。これは予言値 0.15 と矛盾しない。また、 $t\bar{t}$ 間のスピン相関を直接に測定する解析が進行中である。

テバトロンでのトップクォークの生成は、前述の通り強い相互作用の素過程による $t\bar{t}$ 対生成が主である。これに加えて、電弱相互作用を素過程とするトップクォーク t と反ボトム

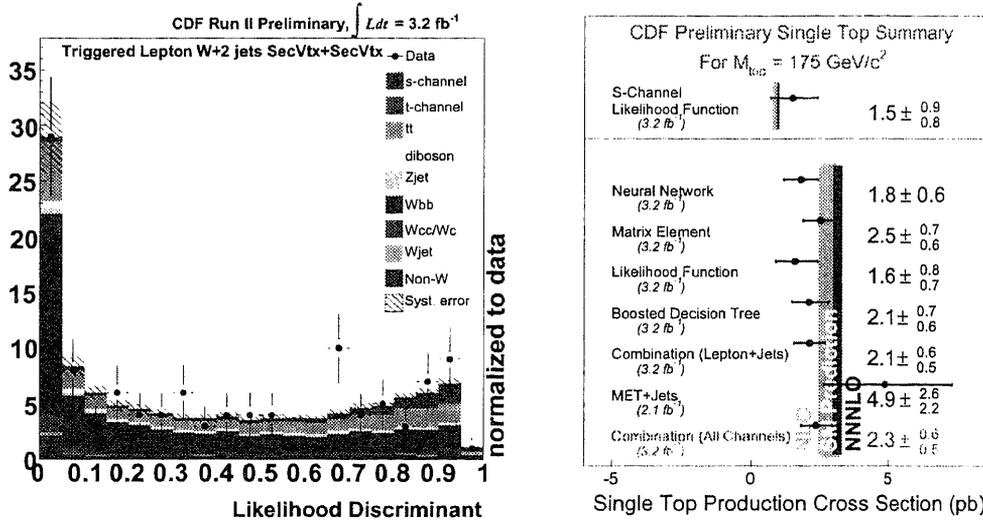


図 4: トップクォーク単一生成の観測. 左: s -channel 過程探索における尤度分布. 右: 生成断面積の一覧 (他チャンネルの解析も含む).

クォーク \bar{b} 対の生成が可能である. これをトップクォークの単一生成と呼ぶ. この素過程は W - t - b 結合を含むため, その生成断面積は小林・益川行列の要素 $|V_{tb}|^2$ に比例する. トップクォークの関係する要素に対して $|V_{tb}| \gg |V_{ts}|, |V_{td}|$ であるため, $|V_{tb}|$ をトップクォークの崩壊分岐比から測定するのは困難であり, 単一生成断面積から求めるのが唯一の現実的な方法である. また, クォーク世代数を仮定しない決定が可能であり, 第 4 世代クォークや荷電ヒッグス粒子の寄与などの標準理論を超える物理に対する感度を持つ. 当グループでは, 中間状態に W ボソンが時間方向に交換される素過程 (s -channel 過程) に特化した解析を行った. トップクォークは $t \rightarrow W^+b$ と崩壊するので, 終状態は $W^+b\bar{b}$ となる. W ボソンはレプトン-ニュートリノ対への崩壊を用いて観測した. 終状態粒子の運動学的変数および b クォークジェットの識別のための人工ニューラルネットワーク出力を用いて尤度を構築し, 背景事象との分離を図った. 尤度分布を図 4 に示す. 尤度の高い事象が予測される背景事象を超えて観測され, s -channel 素過程によるトップクォーク単一生成断面積を $\sigma = 1.5^{+0.9}_{-0.7} \text{ pb}$ と決定した. また, 行列要素に対して, $|V_{tb}| = 1.32^{+0.27}_{-0.26}$ および $|V_{tb}| > 0.54$ (95% CL) を得た. もうひとつの素過程 (t -channel) の解析と総合して, 両過程の生成断面積 $\sigma = 2.3^{+0.6}_{-0.5} \text{ pb}$ を得た. 背景事象の揺らぎで説明される確率は 3.1×10^{-7} であり, 信号の有意度は正規分布の 5.0σ に対応する. これによりトップクォークの単一生成が観測された. 行列要素については, $|V_{tb}| = 0.91 \pm 0.11 \pm 0.07$ および $|V_{tb}| > 0.71$ (95% CL) の制限を与えた.

(2) 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・反粒子振動の観測にあった. 2006 年度にはこれを達成し, 弱い相互作用に

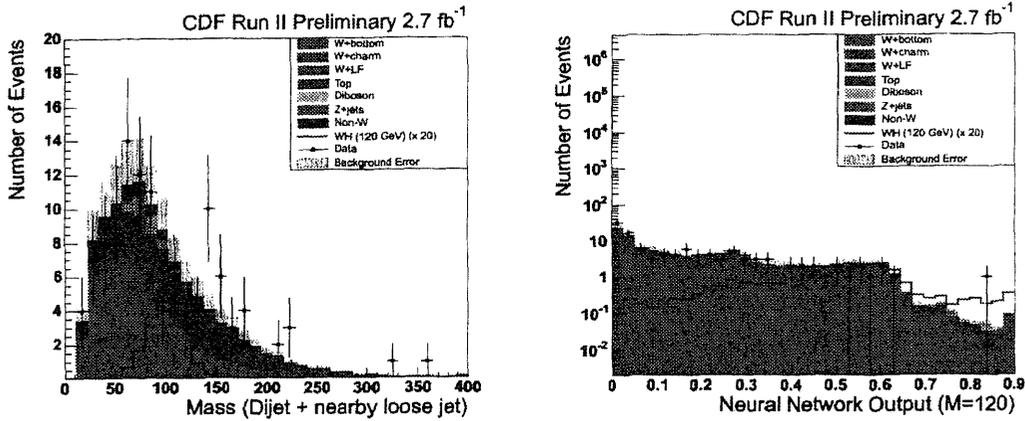


図 5: $\bar{p}p \rightarrow WHX \rightarrow \ell\nu b\bar{b}X$ 過程によるヒッグス粒子の探索. 左: 二次崩壊点を用いて同定した $b\bar{b}$ ジェット対の質量分布. 右: 人工ニューラルネットワークを用いた信号と背景事象の分離.

における CP 対称性の破れを記述する小林・益川理論を高精度で検証することに成功した.

B_s^0 中間子の研究は, 電子陽電子衝突による B ファクトリー実験では実行が難しく, CDF 実験での特徴となる. 中性流による稀崩壊 $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ の探索, $b \rightarrow sl^+l^-$ 崩壊の観測および角分布の前後方非対称度の測定などの研究が進められている.

(3) 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は, 素過程 $gg \rightarrow H$ による単一生成と弱ゲージボソン W^\pm, Z^0 との随伴生成が主である. 質量が軽い場合 (およそ $120 \text{ GeV}/c^2$ 以下) は $H \rightarrow b\bar{b}$ 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, 単一生成が一番高いが, ヒッグス粒子が軽い場合には $p\bar{p} \rightarrow b\bar{b}X$ 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 $p\bar{p} \rightarrow HWX \rightarrow b\bar{b}\ell\nu X$ 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 $b\bar{b}$ 対の随伴生成である. 図 5 (左) に $b\bar{b}$ 候補対の質量分布を示す. 他の運動学的変数を加えて人工ニューラルネットワークの入力として利用し, 信号と背景事象の分離を行った. その出力を図 5 (右) に示す.

中間質量領域 ($140 \text{ GeV}/c^2$ 程度) では, $H \rightarrow W^+W^{(*)-}$ 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 $p\bar{p} \rightarrow HX$ 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

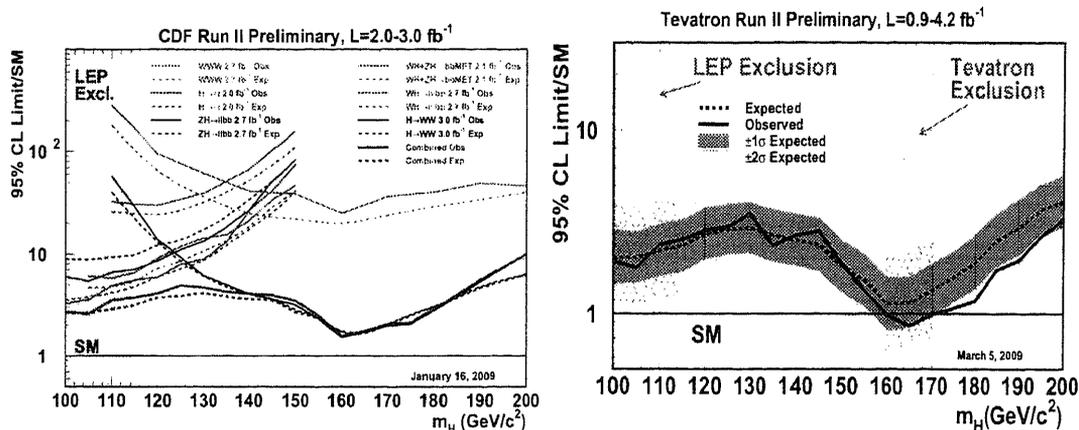


図 6: 標準模型ヒッグス粒子探索の結果. 生成断面積の上限 (観測値) の理論値に対する比を質量の関数として示したもの. 左: CDF 実験の結果, 右: CDF 実験と D0 実験の結果を総合したもの.

6 (左) にこれらの上限値を標準理論による予言値で規格化したものを示す. 低質量領域では実験値は予言値の数倍であり, 質量 $160 \text{ GeV}/c^2$ 付近では 2 倍以下である. テバトロンでのもうひとつの実験 (D0 実験) の結果と総合した場合の上限値を同図 (右) に示す. 質量 $160 < M_{\text{Higgs}} < 170 \text{ GeV}/c^2$ の範囲では実験の上限値が理論値を下回っており, 標準理論のヒッグス粒子はこの質量領域に存在しないことが初めて示された.

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 2011 年頃までは, エネルギー最先端の実験であり続ける. CDF Run II 実験は, 米国 2010 年度の運転が決定し, 2011 年度も継続の可能性が検討されている. 2010 年末には $8-9 \text{ fb}^{-1}$ 相当のデータを蓄積する予定であり, ヒッグス粒子の質量に対するより強い制限, 穂湯准理論を超える物理の探索など, 素粒子物理学の知見を深める多くの結果を生み出すと期待される.

【2】 LHC ATLAS 実験

欧州セルン研究所の陽子・陽子衝突型加速器 Large Hadron Collider (LHC) は, すべての加速器用電磁石の据え付け調整が終了し, 2008 年 9 月 10 日に陽子ビームを周回させるイベントを成功させ, 公式に LHC の完成を宣言した. 前段加速器である SPS からの 450 GeV の陽子ビームを時計方向と反時計方向の両方向に安定に周回させることで, 新しく設置した LHC 加速器システムの総合能力を実証できた. ATLAS 検出器は, 直ちに, ビームを上流のダンプに衝突させることで発生するミュオン粒子等を実際に検出した.

予定していた 450 GeV の陽子ビームの衝突は, 9 月 19 日に発生した大量のヘリウム漏れのために中止した. LHC では 8 分割したセクター毎に超伝導冷却の調整を行っている. ヘリウム漏れしたセクターは 4 TeV の加速エネルギー相当の温度までしか事前試験されていなかった. 今回, 5.2 TeV まで冷却した際に, 超伝導電磁石間をつなぐバスバーの抵抗のた

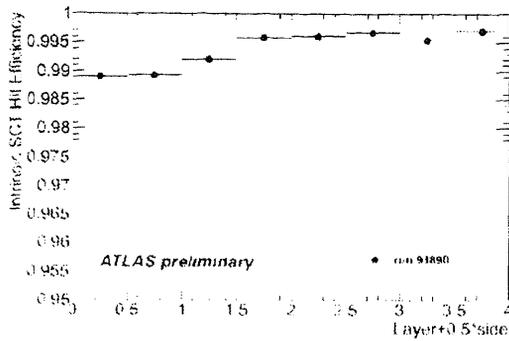


図 7: バレル部 SCT の 8 各面での飛跡検出効率。

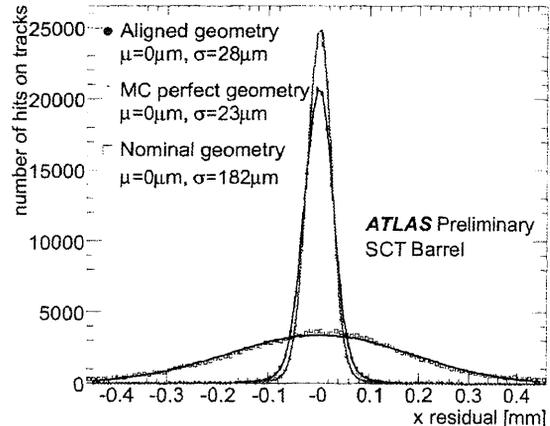


図 8: バレル部 SCT の各モジュール位置合せの結果。

めに電源がトリップし、その際に電気アークが発生しヘリウム容器内の圧力が上昇し真空隔壁が破壊された。バスバーの不良な接合 ($0.5 \text{ n}\Omega$ 以下が要求値) が原因であり、抵抗測定精度の改善、圧力上昇を抑制する安全弁の増設により同様な事故を防ぐ対処を行う。事故セクターは現在は復旧し、2009 年 10 月からの 10 TeV での衝突実験のための調整を再開している。

筑波大学のグループは、半導体を用いた中央部飛跡検出器 (SCT) の建設を担当してきた。SCT の運転調整を分担し、物理解析の準備を進めた。また、ビーム輝度を LHC 設計値の 10 倍にする SuperLHC 実験が検討されているが、そのような高放射線環境でも稼動する新しいシリコン検出器の開発と、SOI ピクセル検出器の開発を継続した。

(1) LHC での物理解析の準備

衝突実験初期のデータから、 W/Z 粒子やトップクォークの観測が可能であり、生成断面積などの物理結果が期待できるが、同時にこれらは検出器の調整に重要な事象でもある。

Z 粒子からの μ 粒子は、内部飛跡検出器とミュオン粒子検出器での運動量測定の直接比較に利用できる。後述の宇宙線飛跡の解析やシミュレーションにより、 Z 粒子の質量分解能の評価を行っている。

検出器の質量分布は、電子のエネルギー測定に直接影響するため、衝突データを用いて詳細に評価したい。シミュレーション事象で $\gamma \rightarrow e^+e^-$ を捉えることで、検出器の質量分布を評価する方法を検討している。

トップクォークからの W 粒子がジェットに崩壊する事象は、ジェットのエネルギー較正に用いることができる。そのバックグラウンドになる $W + \text{ジェット}$ 事象を新しいモンテカルロジェネレータで発生させ従来の方法と比較している。

(2) シリコン飛跡検出器 (SCT)

SCT 飛跡検出器は、2007 年 2 月に地下の ATLAS 検出器本体に組み込まれた。配線作業や冷却システムの調整を経て、2008 年 2 月に宇宙線の飛跡を初めて観測した。LHC 初ビーム事象の観測とともに、多くの宇宙線事象を収集し検出器の調整をすすめている。

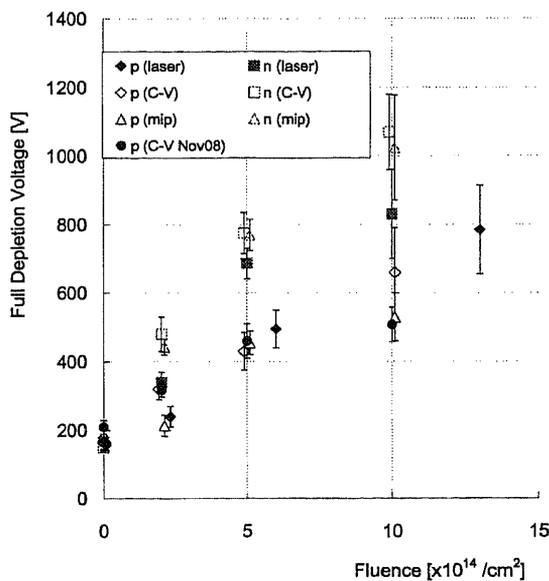


図 9: 全空乏化電圧の放射線量依存性.

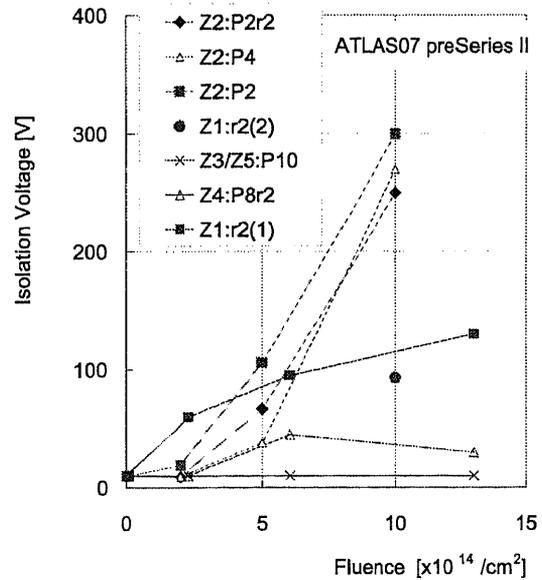


図 10: 電極間信号分離電圧の放射線量依存性.

宇宙線ランでは、2 T のソレノイド磁場を加えた場合、加えない場合についてデータを集め、各々で約 100 万 SCTトラックを再構成できた。これらのデータを用いて、信号読み出しのタイミング調整、検出器の位置調整、検出効率評価、磁場のキャリア移動への影響 (Lorentz 効果) の評価などを行った。図 7 はバレル部 4 層計 8 面の検出効率を面毎に示している。センサー面に 40 度以内の角度で入射する飛跡に対して対応する信号が得られる割合は、ほぼ 99% 以上である。図 8 はバレル部のモジュールの位置合せの精度を示している。運動エネルギーの高い (2 GeV 以上) 宇宙線飛跡を基準とし、それからのヒット位置のずれを示している。測定で求めた位置に基づく位置分解能 $182 \mu\text{m}$ は、モジュール位置調整の結果 $28 \mu\text{m}$ に改善された。検出器が完全に位置合せできた場合の予想値は $23 \mu\text{m}$ であり、各モジュールは $16 \mu\text{m}$ の精度で位置調整できたことに対応する。

宇宙線が通過するのは SCT 検出器の一部であるので、実際の衝突ランでは全体に対して同様の調整を行う必要がある。宇宙線での実績から、調整方法の正当性および SCT 性能がほぼ設計値に近いことを実証できた。

(3) 放射線耐性に優れたシリコンセンサーの開発

LHC の設計最大輝度は $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ である。継続して物理の測定精度を向上させるために、2016 年までに新入射器の建設をし、輝度を一桁上げる SuperLHC 実験が計画されている。

現 SCT は、LHC 実験で 10 年分に相当する $2 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2$ の放射線耐性がある。センサー基板には n 型の高抵抗シリコンを用いているが、放射線を浴びると実効的に p 型不純物が増え、全空乏化に要する電圧は次第に増大する。読み出し電極には p 型シリコンを用いているので、基板が p 型に変換した後は全空乏化電圧がシステムの耐圧 (500 V) を超えると電極での信号分離ができなくなる。

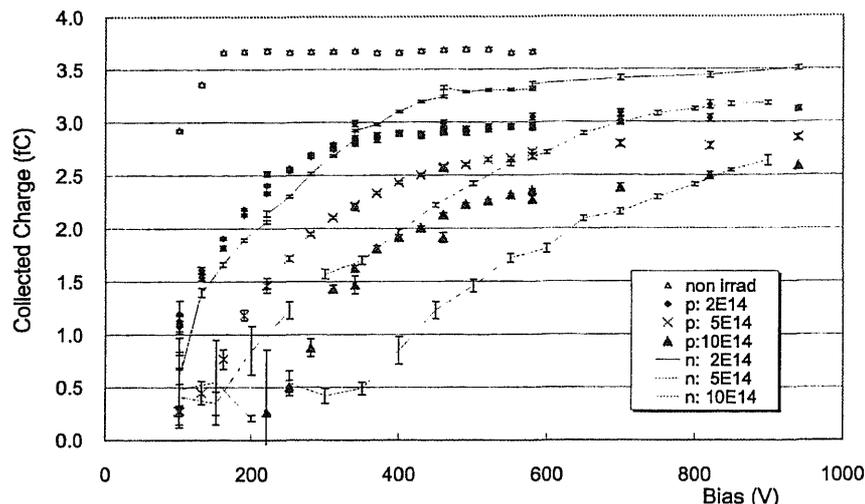


図 11: 収集電荷量のバイアス電圧依存性.

SuperLHC でも使用可能な高放射線耐性のセンサーとして n 型電極, p 型基板を用いたセンサーを開発している. p-n 接合が常に読み出し電極側にあるので, 全空乏化電圧がシステム耐圧を超えたら, 部分空乏状態でも信号が読み出せる利点がある. 昨年度までに, FZ 法による高抵抗の p 型シリコンを候補に決定し, 電極分離の構造を様々に変えたセンサーを試作した. 陽子線, 中性子, Co ガンマ線を実際に照射し, 性能評価を行った.

図 9 は, 全空乏化電圧の照射量依存性を示す. センサー容量 (C-V) 測定, 赤外レーザーや β 線を用いた収集電荷量の測定の 3 方法で評価し, 互いに矛盾しない結果を得た. 系統的に中性子照射による変化が陽子照射よりも大きな結果が得られた. LHC では中性子と陽子による放射線量がほぼ等量である.

図 10 は電極分離に必要なバイアス電圧の放射線量依存性である. いずれもシステム耐圧の 500 V や全空乏化電圧よりも低いので, センサーとして充分使用可能である. Co 照射しながら測定した結果とも比較を行うことで, 最も適した電極分離方法を決定する必要がある.

図 11 は Sr β 線を用いた電荷収集量の測定値である. 未照射および 3 段階の照射量について, 陽子と中性子の場合で結果を比べている. 照射によりキャリアが捕獲され特に低バイアスで電荷収集量が減少するが, 中性子による減少量は少ないことが分かった.

(4) Silicon-On-Insulator 技術を用いた読み出し一体型ピクセル検出器

Silicon-On-Insulator (SOI) は, エレクトロニクスを酸化膜上の薄いシリコン層に形成し, 高速動作などで優れた特性を示す. 酸化膜下のシリコン基板を高抵抗にすることで粒子検出部として, 読み出し回路一体型ピクセルセンサーの開発を行っている. 沖セミコンダクター社の $0.15 - 0.20 \mu\text{m}$ SOI プロセスを用いて, 32×32 および 128×128 ピクセルセンサーを KEK の先端検出器開発室と共同で試作した. 可視光や X 線に対する応答性能は良好であるが, センサーバイアスを印加するとエレクトロニクス部の動作領域が変わり (バックゲート効果) 読み出しができなくなる. センサー自体は暗電流発生を抑える電極形状の設計変更を

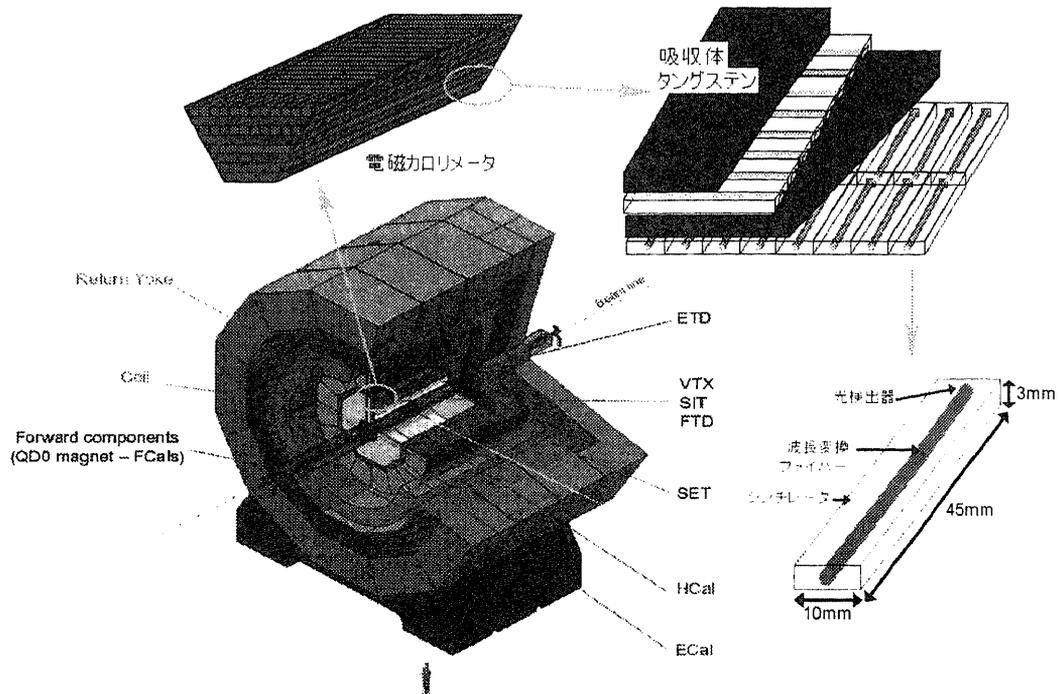


図 12: ILC(ILD) 検出器の構造, および電磁カロリメータのモジュールを一部取り出したもの. カロリメータは, 吸収体とシンチレータ層をもつサンプリングカロリメータとなっており, シンチレータ層は, ストリップシンチレータを横方向と縦方向を交差させ並べた構造になっている. またストリップシンチレータは波長変換ファイバーが埋め込まれ, 光検出器によって読み出される.

経てバイアスを 130 V まで印加できるものができたが, 荷電粒子の測定には, バックゲート効果の抑制と基板の薄化の両面の取り組みが必要である.

Co γ や陽子線を照射することで, 検出器性能の放射線損傷を詳細に測定し, 国際学会で報告した. 放射線損傷は, トランジスタ閾値の変化に現れるが, TCAD シミュレーションにより, 電荷蓄積と閾値変化を定量的に理解する取り組みを開始した.

【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 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 12 左) のうち, 電磁カロリメータ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, シンチレータとタンゲステン板を積層構造にし

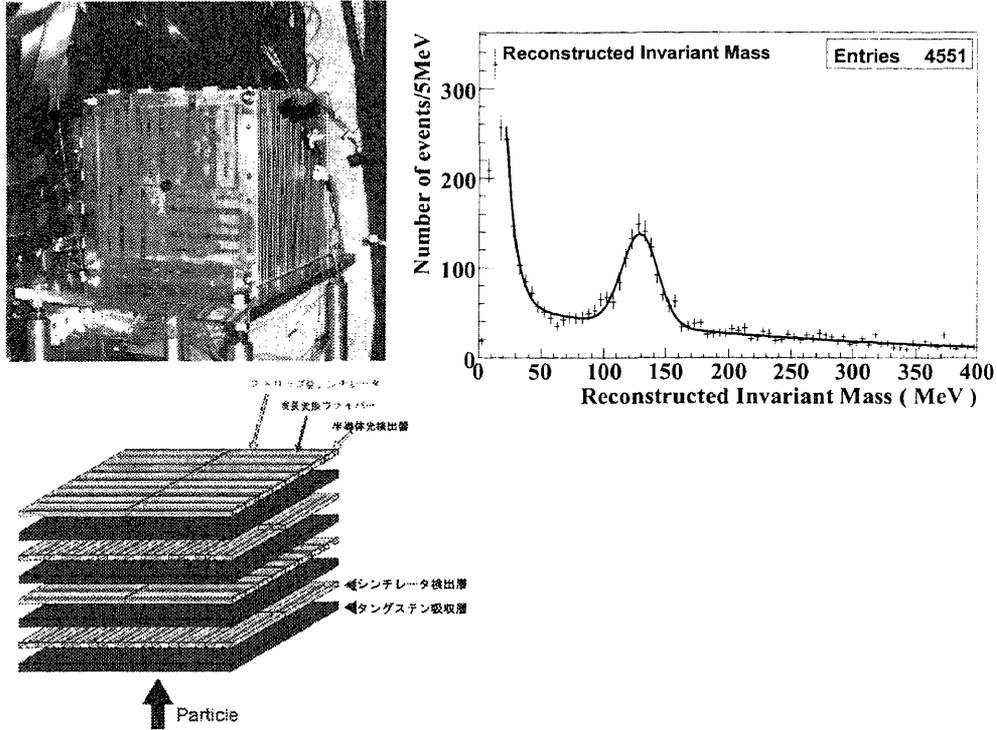


図 13: MPPC を用いた細分割電磁カロリメータの試作機の写真 (左上), 試作機の構造の模式図 (左下), および, 本試作機を用いビームテストにおいて実際に再構成された $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ 事象候補の $M_{\gamma\gamma}$ 分布 (右).

たサンプリング型のものが候補となっている。

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が考えられている.

しかしながら, 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, 非常にコンパクト且つ低コストで磁場の影響を受けないという特徴を持つ, 新しいタイプの半導体光検出器 MPPC (Multi Pixel Photon Counter) が, ILC カロリメータの読み出し用センサーとしては, ほぼ唯一の解となる.

我々は、これまで、ストリップ構造を持ったカロリメータのテストモジュールを作成し、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、およびシミュレーションを用いた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などを行ってきた。

また浜松ホトニクス、KEK 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 1600 ピクセルの $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ の MPPC のサンプルを用い光検出効率、応答線形性、増幅率、ノイズ頻度、クロストークの測定、放射線耐性、信号頻度依存性の測定などの研究開発を行ってきた。

昨年度 (2008 年度) においては、主にカロリメータの光信号読み出しのための、MPPC の研究開発と並行して、ILC カロリメータグループにおいて、MPPC を用いたストリップ型細分割電磁カロリメータのプロトタイプを試作し、米国フェルミ国立加速器研究所において、ビームテストによる性能試験を行った。

図 13 は、MPPC を用いた細分割電磁カロリメータの試作機の写真、構造、および、本試作機を用いビームテストにおいて得られた $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ 事象候補の $M_{\gamma\gamma}$ 分布を示している。

分布のピークは、 π^0 から来たものであり、 $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ 事象において、従来のカロリメータの分割度では不可能であった二つの光子が作る電磁シャワーの分離が、本試作機において可能であることを示している。

今後、長期安定性、多数のサンプルにおける個体差の測定など、引き続き MPPC の基礎研究を進めつつ、新たな試作機による実証試験等も計画している。

【4】 超伝導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、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, $T_c = 0.165\text{ K}$) あるいは W (0.0049 meV, $T_c = 0.016\text{ K}$) を超伝導素材として用い、遠赤外線領域 ($E_\gamma \sim$ 数 10 meV) の一光子ごとのエネルギーを数%の精度で測定するための超伝導検出器 (STJ) の開発を目指したものである。

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いる。ニュートリノは、標準模型の枠内で重いニュートリノ (ν_3) から軽いニュートリノ (ν_2) と光子に寿命約 10^{36} 年で崩壊する。また重たい未知の右巻き weak boson W_R が存在するモデルにおいては、このニュートリノの寿命ははるかに短くなると予想される。現在の W_R の質量下限および W_L との混合角の上限を用いるとニュートリノの寿命は最も短くて 10^{17} 年程度となる。

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となるため、 $110/\text{cm}^3$ 程度存在すると予測されている宇宙背景ニュートリノを用いる。

ニュートリノの二体崩壊で生成する光子のエネルギーを $\sim 30\text{ meV}$ とすると背景雑音となる赤外線背景輻射の光子のエネルギースペクトルに対し、ニュートリノ崩壊の信号はそのエネルギーを高い端として急に落ちるスペクトルの分布として観測される。

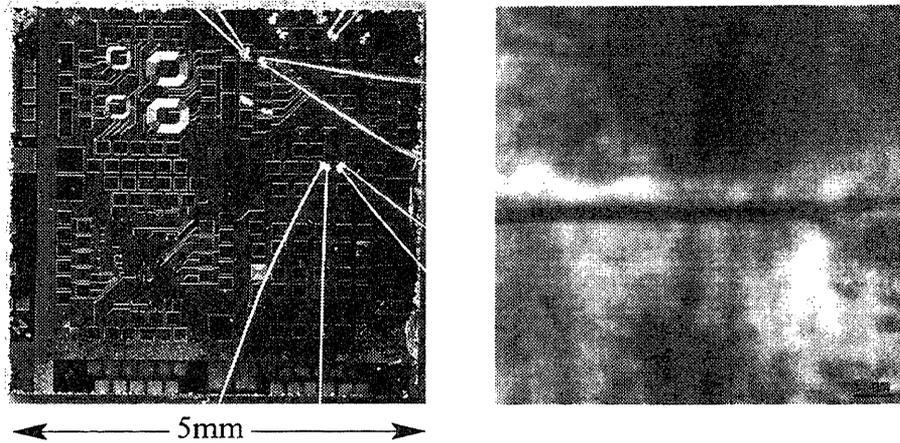


図 14: 試作した Hf-STJ のチップ (左), および透過型電子顕微鏡 (TEM) による Hf 膜の断面図 (右). 5mm×5mm のサイズの基板の上に様々なサイズ・形状の Hf-HfO_x-Hf 膜が成膜・加工されている. 断面図では, およそ 2nm 程度の酸化膜が形成されていることが分かる.

我々は, これまでに, 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い, 検出器に要求される性能は, 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であることがわかった.

そこで, 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 開発を進めてきた. 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.

これまで, Hf 成膜 (スパッタリング) のためのガス圧力・放電パワー等の最適条件の探索, および Hf 膜のパターン加工方法の確立を行った. 特に Hf 膜の場合, これまでの Nb 膜や Al 膜において用いられてきた加工技術が使えないため, うまく成膜されていることが確認されれば, Hf 膜のパターン加工例としては, 世界初である.

図 14 は, 試作した Hf-STJ のチップ, および透過型電子顕微鏡 (TEM) によって観察された成膜された Hf-HfO_x-Hf の酸化膜付近の断面の様子である. およそ 2nm 程度の酸化膜が形成されていることが分かる.

2009 年度は, 試作した, Hf-STJ の低温における測定を行う. 測定には, 20 mK 程度の極低温での安定した運転が必要となってくるが, これには, 低温物性グループ (大塚研) より希釈冷凍機を借用し測定準備を進めている. 更に, ファイバーを用いて実際に赤外線を試料に当て応答を見るということも目標としている.

今後は, Hf-STJ 製作に向けた技術的問題は, ほぼクリアしたので, 今後 3 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. また, 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, 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: 受川 史彦)
校費: 60,000 千円, 旅費: 14,000 千円
2. 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 35,800 千円
3. 科学研究費補助金「P 型シリコンを用いた高耐放射線マイクロストリップ検出器の開発」
原 和彦: 基盤研究 (C) 1,900 千円
4. 科学研究費補助金「スピン偏極度相関を用いたトップクォーク対生成機構の解明」
武内 勇司: 若手研究 (B) 1,200 千円
5. 科学研究費補助金「CDF 実験におけるベクトルボソン融合事象に関する研究」
丸山 和純: 若手研究 (B) 900 千円
6. 科学研究費補助金「中性 B 中間子の $\eta'\eta'K_S$ 崩壊の探索と CP 非保存現象の研究」
三宅 秀樹: 若手研究 (B) 900 千円

【6】 研究発表

(1) 学会誌等への発表論文

1. “First Observation of the Decay $B_s^0 \rightarrow D_s^- D_s^+$ and Measurement of Its Branching Ratio,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **100**, 021803 (2008).
2. “Search for Standard Model Higgs Bosons Produced in Association with W Bosons,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **100**, 041801 (2008).
3. “Cross Section Constrained Top Quark Mass Measurement from Dilepton Events at the Tevatron,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **100**, 062005 (2008).
4. “Direct Measurement of the W Boson Width in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **100**, 071801 (2008).
5. “Observation of Orbitally Excited B_s Mesons,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **100**, 082001 (2008).

6. “First Measurement of the Production of a W Boson in Association with a Single Charm Quark in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **100**, 091803 (2008).
7. “Search for $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ and $B^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ Decays with 2 fb^{-1} of $p\bar{p}$ Collisions,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **100**, 101802 (2008).
8. “Measurement of Inclusive Jet Cross Sections in $Z/\gamma^*(\rightarrow e^+e^-)+\text{Jets}$ Production in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **100**, 102001 (2008).
9. “Measurement of Lifetime and Decay Width Difference in $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$ Decays,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **100**, 121803 (2008).
10. “Evidence for $D^0-\bar{D}^0$ Mixing Using the CDF II Detector,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **100**, 121802 (2008).
11. “First Flavor-Tagged Determination of Bounds on Mixing-Induced CP Violation in $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$ Decays,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **100**, 161802 (2008).
12. “Search for Heavy Top-like Quarks Using Lepton Plus Jets Events in 1.96 TeV $p\bar{p}$ Collisions,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **100**, 161803 (2008).
13. “Observation of the Decay $B_c^\pm \rightarrow J/\psi\pi^\pm$ and Measurement of the B_c^\pm Mass,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **100**, 182002 (2008).
14. “Strong Evidence for ZZ Production in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **100**, 201801 (2008).
15. “Search for the Higgs Boson in Events with Missing Transverse Energy and b Quark Jets Produced in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **100**, 211801 (2008).
16. “Search for Resonant $t\bar{t}$ Production in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **100**, 231801 (2008).
17. “Measurement of the Cross Section for W -boson Production in Association with Jets in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **77**, 011108 (2008).
18. “Limits on the Production of Narrow $t\bar{t}$ Resonances in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **77**, 051102 (2008).
19. “Search for Chargino-Neutralino Production in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV with high- p_T Leptons,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **77**, 052002 (2008).

20. “Observation of Exclusive Dijet Production at the Fermilab Tevatron $p\bar{p}$ Collider,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **77**, 052004 (2008).
21. “Measurement of Ratios of Fragmentation Fractions for Bottom Hadrons in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **77**, 072003 (2008).
22. “Measurement of Correlated $b\bar{b}$ Production in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1960$ GeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **77**, 072004 (2008).
23. “Search for Third Generation Vector Leptoquarks in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **77**, 091105 (2008).
24. “Two-particle Momentum Correlations in Jets Produced in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **77**, 092001 (2008).
25. “First Run II Measurement of the W Boson Mass,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **77**, 112001 (2008).
26. “Search for Pair Production of Scalar Top Quarks Decaying to a τ Lepton and a b Quark in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **101**, 071802 (2008).
27. “Search for Doubly Charged Higgs Bosons with Lepton-Flavor-Violating Decays involving Tau Leptons,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **101**, 121801 (2008).
28. “Search for Large Extra Dimensions in Final States Containing One Photon or Jet and Large Missing Transverse Energy Produced in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **101**, 181602 (2008).
29. “Search for the Flavor-Changing Neutral-Current Decay $t \rightarrow Zq$ in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **101**, 192002 (2008).
30. “Forward-Backward Asymmetry in Top Quark Production in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **101**, 202001 (2008).
31. “Search for Supersymmetry in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV Using the Tripleton Signature for Chargino-Neutralino Production,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **101**, 251801 (2008).
32. “Search for the Higgs Boson Produced in Association with $Z \rightarrow \ell^+ \ell^-$ in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **101**, 251803 (2008).
33. “Measurement of the Single Top Quark Production Cross Section at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **101**, 252001 (2008).

34. “Model-Independent and Quasi-Model-Independent Search for New Physics at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **78**, 012002 (2008).
35. “Cross Section Measurements of High- p_T Dilepton Final-State Processes Using a Global Fitting Method,”
A. Abulencia *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **78**, 012003 (2008).
36. “Search for New Heavy Particles Decaying to $Z^0 Z^0 \rightarrow eeee$ in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **78**, 012008 (2008).
37. “Search for Standard Model Higgs Boson Production in Association with a W Boson at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **78**, 032008 (2008).
38. “Search for Heavy, Long-Lived Neutralinos that Decay to Photons at CDF II Using Photon Timing,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **78**, 032015 (2008).
39. “Measurement of b -jet Shapes in Inclusive Jet Production in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboraton], Phys. Rev. D **78**, 072005 (2008).
40. “Measurement of the Inclusive Jet Cross Section at the Fermilab Tevatron $p\bar{p}$ Collider Using a Cone-Based Jet Algorithm,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **78**, 052006 (2008).
41. “First Measurement of the Fraction of Top Quark Pair Production Through Gluon-Gluon Fusion,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **78**, 111101 (2008).
42. “Search for a Higgs Boson Decaying to Two W Bosons at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **102**, 021802 (2009).
43. “Search for High-Mass e^+e^- Resonances in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **102**, 031801 (2009).
44. “Search for Maximal Flavor Violating Scalars in Same-Charge Lepton Pairs in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **102**, 041801 (2009).
45. “First Bound on the total Width of the Top Quark in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **102**, 042001 (2009).
46. “Measurement of Resonance Parameters of Orbitally Excited Narrow B^0 Mesons,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **102**, 102003 (2009).

47. “Measurement of the Top Quark Mass with Dilepton Events Selected Using Neutroevolution at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **102**, 152001 (2009).
48. “Global Search for New Physics with 2.0 fb^{-1} at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **79**, 011101 (2009).
49. “Search for the Rare Decays $B^+ \rightarrow \mu^+ \mu^- K^+$, $B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- K^*(892)^0$, and $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- \phi$ at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **79**, 011104(R) (2009).
50. “First Measurement of the Ratio of Branching Fractions $\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+ \mu^- \bar{\nu}_\mu)/\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+ \pi^-)$,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **79**, 032001 (2009).
51. “Search for New Physics in the $\mu\mu + e/\mu + E_T$ Channel with a low- p_T Lepton Threshold at the Collider Detector at Fermilab,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **79**, 052004 (2009).
52. “A Search for High-Mass Resonances Decaying to Dimuons at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **102**, 091805 (2009).
53. “Measurement of W -Boson Helicity Fractions in Top-Quark Decays Using $\cos\theta^*$,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Lett. B **674**, 160 (2009).
54. “Search for Hadronic Decays of W and Z Bosons in Photon Events in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96 \text{ GeV}$,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], arXiv:0803.4264 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. D)
55. “Measurement of the Fraction of $t\bar{t}$ Production via Gluon-Gluon Fusion in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96 \text{ TeV}$,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], arXiv:0807.4262 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
56. “First Observation of $\bar{B}_s^0 \rightarrow D_s^\pm K^\mp$ and Measurement of the Ratio of Branching Fractions $\mathcal{B}(\bar{B}_s^0 \rightarrow D_s^\pm K^\mp)/\mathcal{B}(\bar{B}_s^0 \rightarrow D_s^+ \pi^-)$,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], arXiv:0809.0080 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
57. “The First Measurement of the Top Quark Mass at CDF II in the Lepton+Jets and Dilepton Channels Simultaneously,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], arXiv:0809.4808 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. D)
58. “Top Quark Mass Measurement in the $t\bar{t}$ All Hadronic Channel using a Matrix Element Technique in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96 \text{ TeV}$,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], arXiv:0811.1062 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. D)

59. “Inclusive Search for Squark and Gluino Production in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], arXiv:0811.2512 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
60. “Measurement of the k_T Distribution of Particles in Jets Produced in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], arXiv:0811.2820 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
61. “Search for New Particles Decaying into Dijets in Proton-Antiproton Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], arXiv:0812.4036 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. D)
62. “Observation of the New Charmless Decays of Bottom Hadrons,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], arXiv:0812.4271 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
63. “Top Quark Mass Measurement in the Lepton plus Jets Channel Using a Modified Matrix Element Method,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], arXiv:0812.4469 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
64. “Measurement of Cross Sections for b Jet Production in Events with a Z Boson in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], arXiv:0812.4458 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. D)
65. “Direct Measurement of the W Production Charge Asymmetry in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], arXiv:0901.2169 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
66. “Search for Top-Quark Production via Flavor-Changing Neutral Currents in $W+1$ Jet Events at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], arXiv:0812.3400 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
67. “Measurement of the Top Quark Mass at CDF Using the “Neutrino ϕ Weighting” Template Method on a Lepton Plus Isolated Track Sample,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], arXiv:0901.3773 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. D)
68. “Search for the Decays $B_{(s)}^0 \rightarrow e^+\mu^-$ and $B_{(s)}^0 \rightarrow e^+e^-$ in CDF Run II,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], arXiv:0901.3803 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)

69. “Measurement of the $t\bar{t}$ Production Cross section in 2 fb^{-1} of $p\bar{p}$ Collisions at 1.96 TeV Using Lepton Plus Jets Events with Soft Muon b -Tagging,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], arXiv:0901.4142 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. D)
70. “Energy calibration of b -quark jets with $Z \rightarrow b\bar{b}$ decays at the Tevatron collider,”
J. Donini, T. Tomura *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **596**, 354 (2008).
71. “Comparison of charge collection efficiency of segmented silicon detectors made with FZ and MCz p-type silicon substrates”,
G. Casse, K. Hara *et al.*, Nucl. Instrum. Methods **A591**, 178-180 (2008).
72. “Combined performance tests before installation of the ATLAS Semiconductor and Transition Radiation Tracking Detectors ”,
E. Adat, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa, *et al.*, J. of Instrumentation (JINST) **3**, P08003 (2008).
73. “The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider”,
G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa, *et al.*, JINST **3**, S08003 (2008).
74. “The integration and engineering of the ATLAS SemiConductor Tracker barrel”,
A. Abdesselam, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa, *et al.*, INST **3**, 10006 (2008).
75. “Alignment of the Pixel and SCT Modules for the 2004 ATLAS Combined Test-Beam”,
A. Ahmad, K. Hara, *et al.*, JINST **3**, P09004 (2008).
76. “Engineering for the ATLAS SemiConductor Tracker (SCT) End-cap”,
A. Abdesselam, K. Hara *et al.*, JINST **3**, P05002 (2008).

(2) 学会・研究会での講演（国内）

1. 永野間 淳二: CDF 実験におけるトップクォーク対共鳴状態の探索,
日本物理学会 2008 年秋季大会 (2008 年 9 月 20 日-23 日), 山形大学.
2. 木村 直樹: CDF 実験におけるトップクォーク対生成でのグルーオン融合の割合の測定,
日本物理学会 2008 年秋季大会 (2008 年 9 月 20 日-23 日), 山形大学.
3. 深見 智代: CDF-TOF 用光電子増倍管の時間分解能の長期的変動,
日本物理学会 2008 年秋季大会 (2008 年 9 月 20 日-23 日), 山形大学.
4. 林 隆康: LHC-ATLAS 実験 SCT シリコン飛跡検出器のコミッショニング - I ,
日本物理学会 2008 年秋季大会 (2008 年 9 月 20 日-23 日), 山形大学.
5. 秦野 博光: SLHC のためのシリコンマイクロストリップ検出器の開発,
日本物理学会 2008 年秋季大会 (2008 年 9 月 20 日-23 日), 山形大学.

6. 嶋 慶太：FTBL を用いた ATLAS-SCT モジュールの試験とビームパラメータの測定結果，日本物理学会 2008 年秋季大会（2008 年 9 月 20 日-23 日），山形大学.
7. 瀬賀 智子：SOI 技術を用いた pixel 検出器の開発（放射線損傷試験），日本物理学会 2008 年秋季大会（2008 年 9 月 20 日-23 日），山形大学.
8. 高橋 優介：ILC カロリメータに用いる光検出器 MPPC の性能評価，日本物理学会 2008 年秋季大会（2008 年 9 月 20 日-23 日），山形大学.
9. 武政 健一：Hf-STJ（超伝導トンネル接合素子）光検出器の開発，日本物理学会 2008 年秋季大会（2008 年 9 月 20 日-23 日），山形大学.
10. 武内 勇司: CDF の最近の結果，
科研費特定領域「フレーバー物理の新展開」第三回研究会 (2009 年 3 月 9 日-10 日)，
愛知県額田郡.
11. 永野間 淳二: CDF での B の物理，
科研費特定領域「フレーバー物理の新展開」第三回研究会 (2009 年 3 月 9 日-10 日)，
愛知県額田郡.
12. 中村 浩二: CDF でのトップの物理，
科研費特定領域「フレーバー物理の新展開」第三回研究会 (2009 年 3 月 9 日-10 日)，
愛知県額田郡.
13. 武内 勇司: CDF 実験の最新結果 (招待講演)，
日本物理学会 第 64 回年次大会 (2009 年 3 月 27 日-30 日)，立教大学.
14. 中村 浩二: Measurement of the Single Top Quark Production Cross Section in 1.96-TeV Proton-Antiproton Collisions，
日本物理学会 第 64 回年次大会 (2009 年 3 月 27 日-30 日)，立教大学.
15. 河内山 真美：SOI 技術を用いた読みだし一体型ピクセル検出器の開発（ENEXSS を用いた放射線損傷シュミレーション），
日本物理学会 第 64 回年次大会 (2009 年 3 月 27 日-30 日)，立教大学.
16. 山田 美帆：SLHC に用いる p 型マイクロストリップセンサーの放射線耐性，
日本物理学会 第 64 回年次大会 (2009 年 3 月 27 日-30 日)，立教大学.
17. 三井 真吾：SLHC 用 P 型シリコン飛跡検出器のレーザーを用いた性能評価，
日本物理学会 第 64 回年次大会 (2009 年 3 月 27 日-30 日)，立教大学.
18. 松隈 恭子： γ コンバージョン事象を用いた ATLAS 内部飛跡検出器の物質評価，
日本物理学会 第 64 回年次大会 (2009 年 3 月 27 日-30 日)，立教大学.
19. 目黒 立真：ATLAS 実験 SCT シリコン飛跡検出器での精密飛跡再構成，
日本物理学会 第 64 回年次大会 (2009 年 3 月 27 日-30 日)，立教大学.
20. 生野 利典：ILC 実験のためのシンチレータストリップによる細分割電磁カロリメータ試作機のビームテスト結果報告 1，
日本物理学会 第 64 回年次大会 (2009 年 3 月 27 日-30 日)，立教大学.

21. 須藤 裕司：ILC 実験のためのシンチレータストリップによる細分割電磁カロリメータ試作機のビームテスト結果報告 2,
日本物理学会 第 64 回年次大会 (2009 年 3 月 27 日-30 日), 立教大学.
22. 武政 健一：ハフニウムを用いた超伝導トンネル接合素子 (STJ) 検出器の開発研究
日本物理学会 第 64 回年次大会 (2009 年 3 月 27 日-30 日), 立教大学.

(3) 国際会議・研究会での講演・ポスター発表

1. Junji Naganoma, "Tevatron Searches in Top Decays,"
XVI International Workshop on Deep-Inelastic Scattering and Related Subjects,
April 7-11, 2008, University College London, London, UK.
2. Koji Nakamura, "Search for Single Top Quark Production Optimized for s -channel
Production at CDF,"
American Physical Society April Meeting, April 11-15, 2008, St. Louis, Missouri,
USA.
3. Yoshikazu Nagai, "Search for Technicolor Particles Produced in Association with a
 W Boson at CDF,"
American Physical Society April Meeting, April 11-15, 2008, St. Louis, Missouri,
USA.
4. Koji Nakamura, "Measurement of the Single Top Production Cross Section at CDF,"
PHENO 2008 Symposium, April 28-30, 2008, University of Wisconsin-Madison, Wis-
consin, USA.
5. Kazuhiko Hara, "Characteristics of the Irradiated Hamamatsu P-Bulk Silicon Mi-
crostrip Sensors",
IEEE Nuclear Science Symposium, Dresden, Germany, October 19-25, 2008.
6. Kazuhiko Hara, "Radiation Resistance of SOI Pixel Sensors Fabricated with OKI
0.15 μm FD-SOI Technology",
IEEE Nuclear Science Symposium, Dresden, Germany, October 19-25, 2008.
7. Yuji Takeuchi, "Recent Results from Tevatron,"
16th YKIS Conference "Progress in Particle Physics 2008," February 16-19, 2009,
Kyoto University, Kyoto, Japan.
8. Tomonobu Tomura, "Recent Results from Tevatron,"
KEK Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology (KEKPH09)," March 3-6,
2009, KEK, Tsukuba, Japan.
9. Naoki Kimura, "Measurement of the Gluon Fusion Fraction in the $t\bar{t}$ Production
Mechanism using the Dilepton Channel at CDF,"
XLIV Rencontres de Moriond, Electroweak Interactions and Unified Theories, March
7-14, 2009, La Thuile, Italy.

10. Yoshikazu Nagai, “Search for technicolor particles produced in association with W boson at CDF,” (poster presentation)
19th Hadron Collider Physics Symposium 2008, May 27–31, 2008, Galena, Illinois, USA.
11. Koji Nakamura, “Search for Single Top Quark Production at CDF \sim Optimized for s -Channel Production \sim ,” (poster presentation)
19th Hadron Collider Physics Symposium 2008, May 27–31, 2008, Galena, Illinois, USA.
12. Koji Nakamura, “Search for Single Top Quark Production at CDF \sim Optimized for s -Channel Production \sim ,” (poster presentation)
Fermilab Users’ Meeting, June 4–5, 2008, Batavia, Illinois, USA.
13. Yuji Sudo, “Study of the Multi-pixel Photon Counter for the ILC Scintillator-strip Calorimeter,” (poster presentation)
TIPP09 Conference, Tsukuba, March 12–17, 2009.
14. Miho Yamada, “Surface damages in P-Bulk Silicon Microstrip Sensors,” (poster presentation)
TIPP09 Conference, Tsukuba, March 12–17, 2009.

(4) 会議・研究会報告書

1. T. Masubuchi, “Search for SM Higgs in the $WH \rightarrow l\nu b\bar{b}$ Channel using $\sim 2 \text{ fb}^{-1}$,”
Proceedings of the XLIII Rencontres de Moriond on Electroweak Interactions and Unified Theories, March 2008. (arXiv:0805.2803 [hep-ex])
2. J. Naganoma, “Tevatron Searches in Top Decays,”
Proc. of XVI Int. Workshop on Deep-Inelastic Scattering and Related Topics, London, UK, April 2008. (<http://dx.doi.org/10.3360/dis.2008.132>)
3. Y. Nagai, “Search for Technicolor Particles Produced in Association with W boson at CDF,”
Proceedings of the 19th Hadron Collider Physics Symposium 2008, Galena, Illinois, USA, May 2008. (arXiv:0808.0226 [hep-ex])
4. K. Hara, H. Miyake, *et al.*, “Radiation Resistance of SOI Pixel Sensors Fabricated with OKI 0.15 μm FD-SOI Technology”,
IEEE Nuclear Science Symposium CR N04-5, Dresden, Germany, October 19–25, 2008.
5. K. Hara, *et al.*, “Characteristics of the Irradiated Hamamatsu P-Bulk Silicon Microstrip Sensors”,
IEEE Nuclear Science Symposium CR N19-2, Dresden, Germany, October 19–25, 2008.

6. S. Terada, K. Hara, *et al.*, “ Thermal Runaway Characteristics of Silicon Microstrip Module Designed for ATLAS Upgrade Inner Tracker at Super LHC”,
IEEE Nuclear Science Symposium CR N30-136, Dresden, Germany, October 19–25, 2008.
7. Y. Unno, K. Hara, *et al.*, “ P-Stop Designs for Reducing Electric Field Strength at Implant Edges”,
IEEE Nuclear Science Symposium CR N30-378, Dresden, Germany, October 19–25, 2008.
8. Y. Ikegami, K. Hara, *et al.*, “ A Control and Monitor System for Serial Powering of Silicon Strip Detectors at SLHC”,
IEEE Nuclear Science Symposium CR N30-454, Dresden, Germany, October 19–25, 2008.

(5) 学位論文

博士論文

1. 木村 直樹: Study of the Top Quark Production Mechanism in 1.96-TeV Proton-Antiproton Collisions. (重心系エネルギー 1.96 TeV の陽子・反陽子衝突におけるトップ・クォーク生成機構の研究),
筑波大学大学院数理物質科学研究科, 2009年2月.
2. 中村 浩二: Measurement of the Single Top Quark Production Cross Section in 1.96-TeV Proton-Antiproton Collisions. (重心系エネルギー 1.96 TeV の陽子・反陽子衝突におけるトップ・クォーク単一生成断面積の測定),
筑波大学大学院数理物質科学研究科, 2009年2月.

修士論文

筑波大学大学院数理物質科学研究科, 2009年2月.

1. 生野 利典: リニアコライダー実験用細分割電磁カロリメータのビームテストによるエネルギー較正と基本性能評価
2. 須藤 裕司: リニアコライダー実験用細分割電磁カロリメータのビームテストによる性能試験と π^0 中間子生成事象の再構成
3. 武政 健一: ニュートリノ崩壊探索実験のためのハフニウムを用いた超伝導トンネル接合素子検出器の開発研究
4. 秦野 博光: Super-LHC 用 P 型シリコンマイクロストリップセンサーの放射線耐性の評価
5. 目黒 立真: ATLAS 実験 SCT シリコン飛跡検出器による精密飛跡再構成

(6) 研究会の主催

1. CDF 実験日本グループ研究会
筑波大学, 2008 年 12 月 13 - 14 日.

【構成員の異動】

1. 2008 年 5 月に永野間淳二が研究員として着任.
2. 2008 年 6 月に丸山和純講師が高エネルギー加速器研究機構准教授へ転出.