

## II . 素粒子実験グループ

教授	金 信弘, 受川 史彦
講師	原 和彦, 武内 勇司, 佐藤構二
研究科特別研究員	倉田 正和, 永井康一
科研費研究員	三宅 秀樹, 永野間 淳二, 戸村 友宣
大学院生	19 名
研究生	1 名
学群 4 年次生	6 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 2009 年秋より衝突実験を開始, 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  $\mathcal{L} = 4.0 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  が達成されており (2010 年 4 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  $73 \text{ pb}^{-1}$ , 全積分ルミノシティは  $8.8 \text{ fb}^{-1}$  に達している。CDF 検出器により記録されたデータ量は約  $7.3 \text{ fb}^{-1}$  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

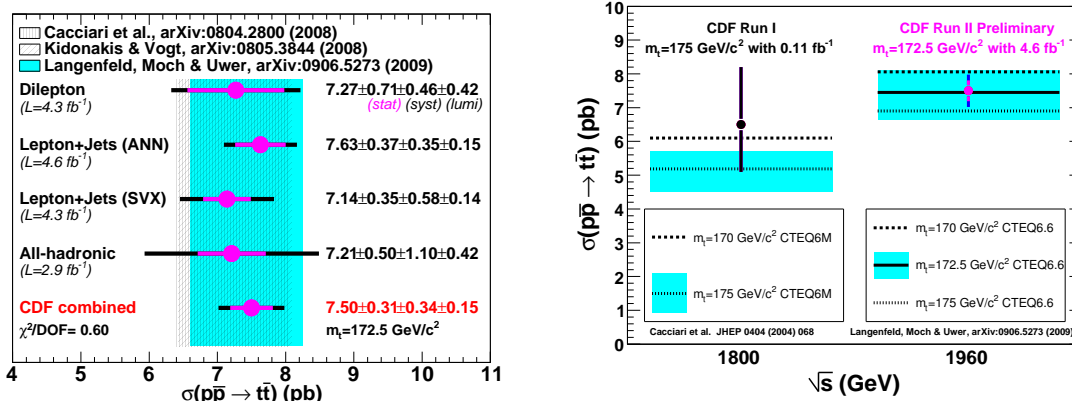


図 1: 左: CDF 実験におけるトップクォークの対生成断面積の測定一覧. 右: 生成断面積の重心系エネルギー依存性.

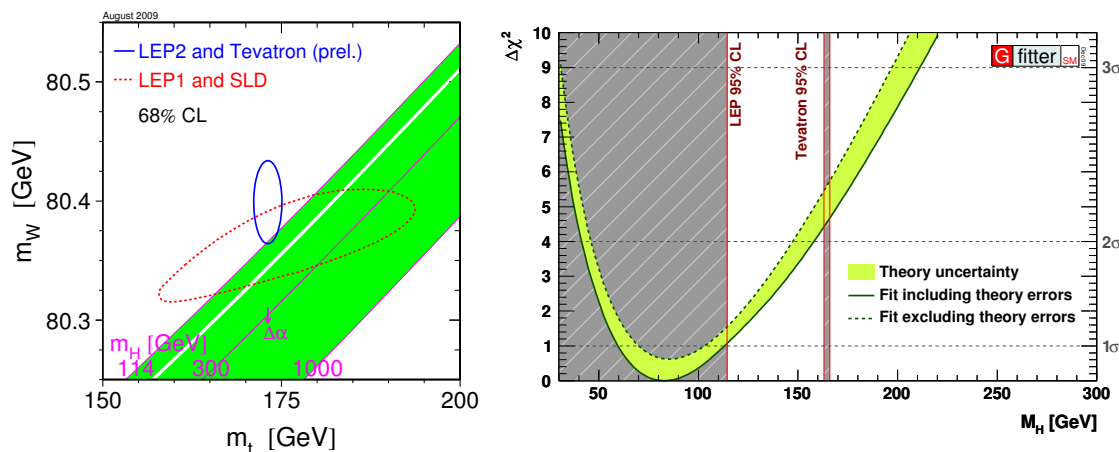


図 2: 左:  $W$  ボソンとトップクォークの質量の測定. 右: ヒッグス粒子の質量に対する制限.

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。その生成断面積が多くの終状態を用いて測定されている(図1)。すべてのチャンネルを総合すると、 $4.6 \text{ fb}^{-1}$  相当のデータを用いて  $\sigma(\bar{p}p \rightarrow t\bar{t}X) = 7.50 \pm 0.31 \pm 0.34 \pm 0.15 \text{ pb}$  という結果を得た。これは、その重心系エネルギー依存性ととも、摂動論的 QCD による理論予言値とよく一致する。

質量も同様に多くの終状態を用いて測定されている。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、D0 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。標準理論ヒッグス粒子の質量について  $m_{\text{Higgs}} = 83^{+30}_{-23} \text{ GeV}/c^2$  (68% CL) および  $m_{\text{Higgs}} < 154 \text{ GeV}/c^2$  (95% CL) を得た。

その他、2009 年度に得られた結果に、dilepton チャンネルを用いた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がある。トップクォークは質量が大きいため、その寿命は  $10^{-24} \text{ s}$  程度と予測される。これは、クォークのハドロン化の時間より短く、よって、トップクォークはクォークのまま崩壊すると予測される。その寿命を直接に測定することはほぼ



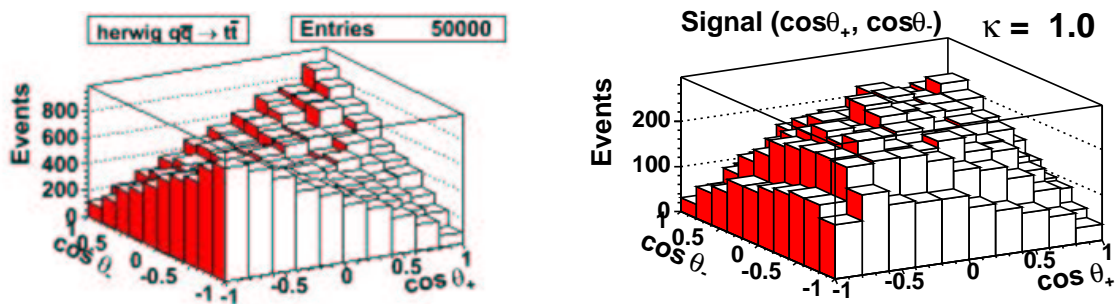


図 3: 素過程  $q\bar{q} \rightarrow t\bar{t}$  による  $t\bar{t}$  対生成での荷電レプトンの角度相関分布 (モンテカルロ事象)。左右は, 検出器の有感領域の影響を考慮する前後。

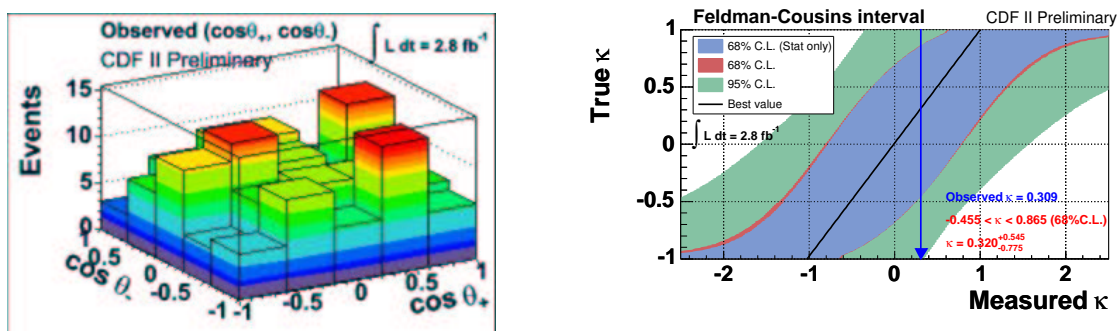


図 4: 左:  $t\bar{t}$  対生成における荷電レプトンの角度相関分布 (実データ)。右: 相関パラメータ  $\kappa$  に対する制限。

不可能であるが, 以下のように対生成におけるスピン相関を観測することにより間接的に検証される。

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 の重心系エネルギー 1.96 TeV では, 前者が 85% と 支配的である。この過程での閾値近くの生成では,  $t\bar{t}$  系の角運動量は  $|1, \pm 1\rangle$  となる。これは強い相互作用のクォークとグルオンの結合がベクトル型であることによる。 $t$  と  $\bar{t}$  のスピンは, 適当な量子化軸を用いると互いに平行であり, つまり相関が存在する。クォークのスピン情報は通常はハドロン化の過程で失われるが, ハドロン化前に崩壊するトップクォークの場合では, 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,  $W$  ボソンからの荷電レプトン  $\ell$  の飛翔方向をトップクォークの静止系で測定すると, これ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,  $t$  および  $\bar{t}$  からのレプトンの角度分布の相関を観測するのが感度が高い。この分布は

$$\frac{1}{N} \frac{d^2 N}{d \cos \theta_+ d \cos \theta_-} = \frac{1 + \kappa \cos \theta_+ \cos \theta_-}{4}$$

で与えられ, 相関が存在すれば, パラメータ  $\kappa$  が 0 でない値となる。素過程  $q\bar{q} \rightarrow t\bar{t}$  におい

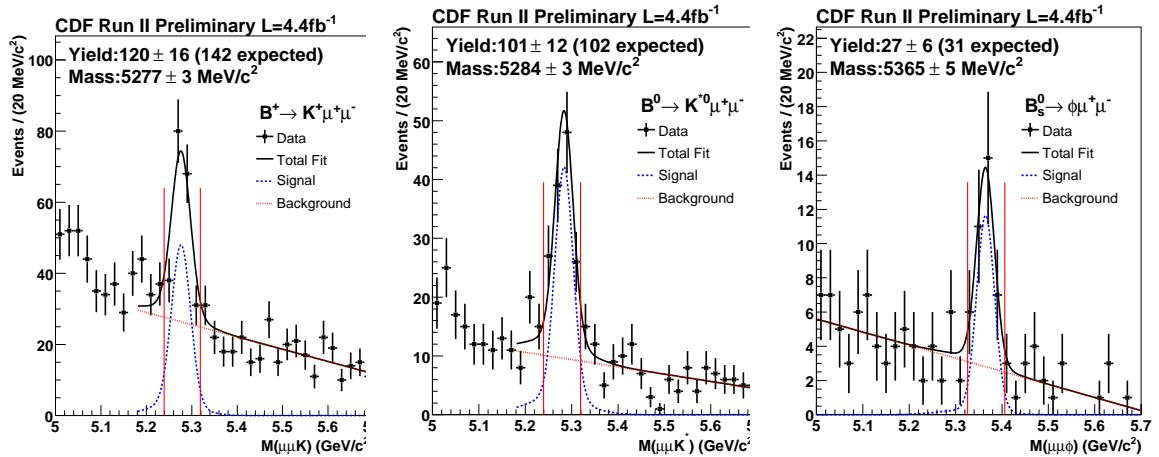


図 5:  $B$  中間子の稀崩壊  $B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-$ ,  $B_d^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$ , および  $B_s^0 \rightarrow \phi \mu^+ \mu^-$  の信号 .

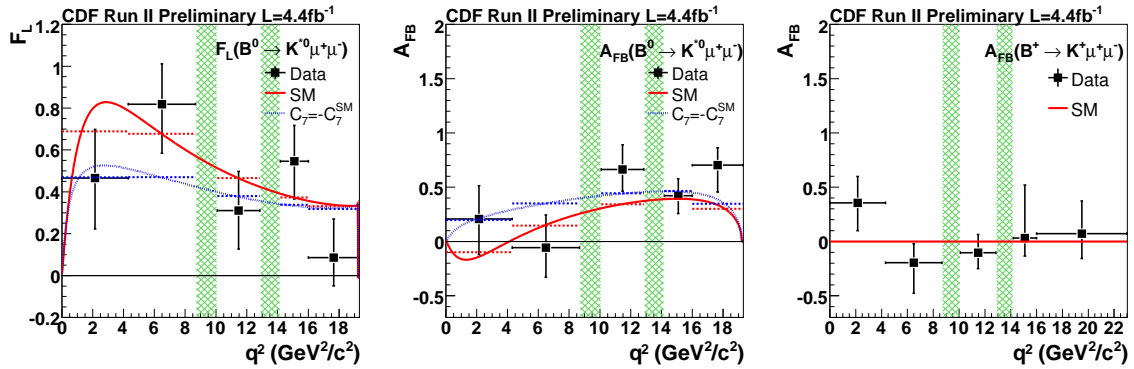


図 6: 左, 中: 崩壊  $B_d^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$  における偏極度とレプトン前後方非対称度の測定 . 右: 崩壊  $B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-$  におけるレプトン前後方非対称度の測定 . すべての分布はレプトン対質量の二乗の関数として示されている .

ては  $\kappa = +1.0$  である . この過程についてモンテカルロ・シミュレーションにより得られた分布を図 3 に示す . 図 4 は, 実データ ( $2.8 \text{ fb}^{-1}$ ) の分布であり, Feldman-Cousins 法を用いて, 相関パラメータを  $\kappa = +0.320_{-0.775}^{+0.545}$  と決定した . これは予言値  $+0.8$  と矛盾しない .

## (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 .

中性流による稀崩壊  $b \rightarrow s \ell^+ \ell^-$  は, いわゆる flavor-changing neutral current による崩壊で

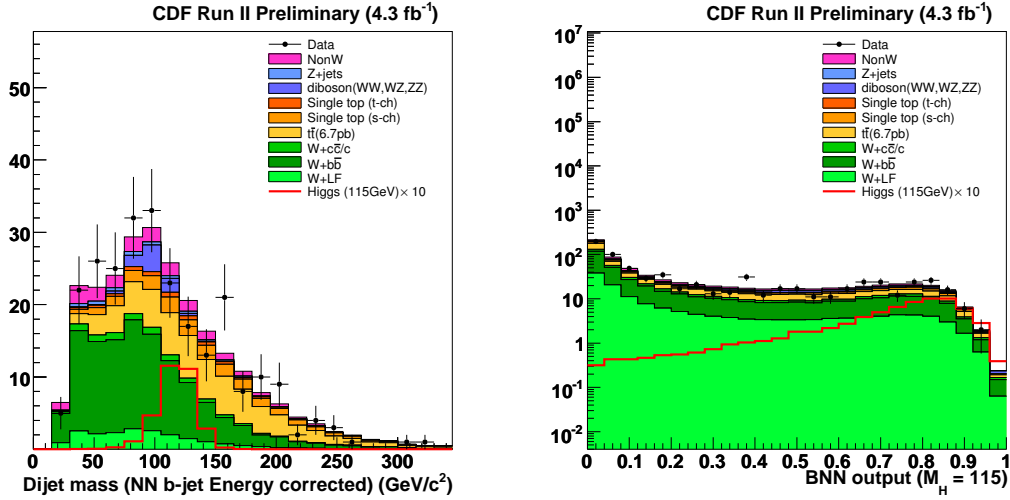


図 7:  $\bar{p}p \rightarrow WHX \rightarrow \ell\nu b\bar{b}X$  過程によるヒッグス粒子の探索．左：二次崩壊点を用いて同定した  $b\bar{b}$  ジェット対の質量分布．右：人工ニューラルネットワークを用いた信号と背景事象の分離．

あり，Belle 実験が標準理論を超える新物理の兆候を観測するなど，注目を集めている．CDF 実験では 2009 年度に，この崩壊の測定結果を得た．図 5 に，再構成された  $B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-$ ， $B_d^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$ ，および  $B_s^0 \rightarrow \phi \mu^+ \mu^-$  の信号を示す．最後の崩壊様式は今回初めて観測された．崩壊  $B_d^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$  は，偏極度およびレプトン角分布の前後方非対称度が新物理の探索に感度を持つ．図 6 にその結果を示す．Belle 実験と同程度の精度が得られており，結果は標準理論および新物理とともに矛盾しない．更なる統計精度の向上が望まれる．

### (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生成は，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 7（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 7（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

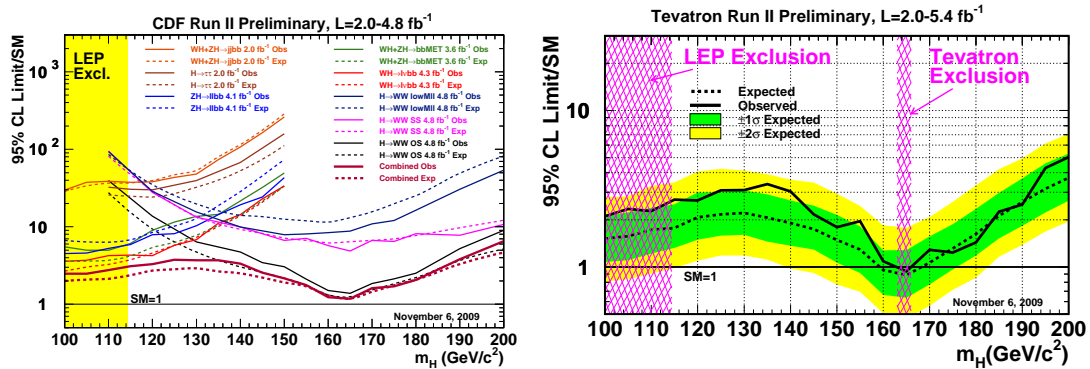


図 8: 標準模型ヒッグス粒子探索の結果．生成断面積の上限 (観測値) の理論値に対する比を質量の関数として示したもの．左: CDF 実験の結果, 右: CDF 実験と D0 実験の結果を総合したもの．

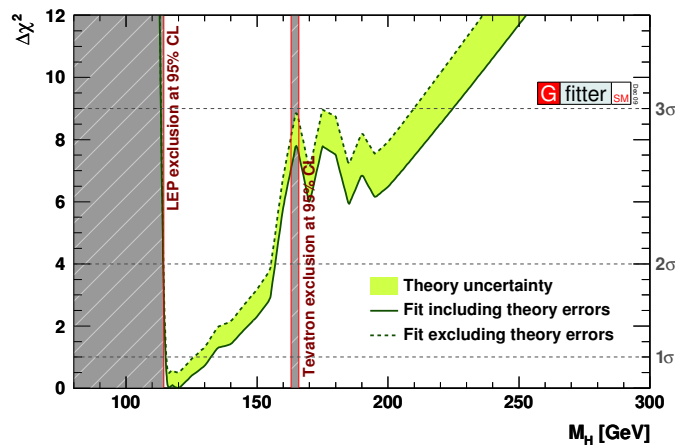


図 9: 標準模型ヒッグス粒子探索の質量に対する制限．間接探索と直接探索の結果を総合したもの．

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 8 (左) にこれらの上限値の標準理論による予言値に対する比を示す．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 1.5 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．質量範囲  $163 < M_{\text{Higgs}} < 166 \text{ GeV}/c^2$  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おいて棄却された．

この直接探索の結果を踏まえて得られた, ヒッグス粒子の質量に対する制限を図 9 に示す．

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．同実験は, 米国 2011 年度の運転が決定し, それ以降も運転継続の可能性が検討されている．2011 年末には  $12 \text{ fb}^{-1}$  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，標準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 LHC (Large Hadron Collider) は，2008 年 9 月に発生したヘリウム漏れ事故を受け，安全設計を増強した上で，2009 年 11 月に初衝突を重心系エネルギー 900 GeV で実現した．2010 年 3 月には 7 TeV に衝突エネルギーを上げ，Tevatron 加速器が 1987 年以来保持してきた加速器の衝突エネルギーの世界記録を大幅に更新した．現在，ビーム輝度を向上中で，2-3 年後には設計エネルギーである 14 TeV を達成する予定である．筑波大学のグループは，LHC の ATLAS 実験に参加している．ATLAS では，質量の起源とされる Higgs 粒子や超対称性粒子，余剰次元に基づくブラックホールの探索などを進めることで，新しい真空や時空の概念に遭遇することも期待されている．

我々は，半導体を用いた中央部飛跡検出器 (SCT) の建設を担当し，SCT の運転調整とともに，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，読みだし回路一体型ピクセル検出器の開発を継続した．

### (1) 内部飛跡検出器の調整

SCT を含む内部飛跡検出器の調整のために，我々は， $Z$  粒子が  $\mu$  粒子対に崩壊する事象を用いて運動量の絶対値を評価する方法をモンテカルロにより検討する事と，陽子衝突で発生する  $\gamma$  が電子陽電子にコンバートする割合を求め，検出器の質量分布を評価する事の 2 項目を進めた．

$Z$  粒子の質量は LEP 実験で精密に測定されているので，崩壊  $\mu$  粒子の運動量測定から，内部飛跡検出器の運動量測定の校正ができる． $\mu$  粒子からの内部輻射の影響を考慮できる解析方法を開発し，30-60 GeV/ $c$  運動量領域で 0.1-0.3% の校正が初期の段階で可能であると評価し，この解析方法の有効性を示した．

初衝突として収集された 900 GeV データを用いて， $\gamma \rightarrow e^+e^-$  を再構成しそのコンバート点の動径分布を求めた (図 10)．電荷の異なる 2 本の飛跡の共通接線を求めることでコンバートを再構成する方法で，カロリメータの情報を用いない．現状では，飛跡に SCT でのヒットを要求しているため，SCT の内部にあるピクセル 3 層と SCT の 2 層目までが明確なピークとして確認されている．900 GeV のシミュレーションデータに対する分布と比較したところ，両者は統計の範囲内で良く一致し，シミュレーションに用いている物質質量分布が間違っていないことが確認できた．更に統計を増やすことで，より精度の高い物質質量評価が可能となり，これは，物質質量が直接測定に影響を与える電子のエネルギー測定等に重要な情報となる．

### (2) 物理解析の準備と最初の物理結果

ハドロン衝突実験では QCD ジェットの生成断面積計算に不定性があり，これは，超対称性粒子を含め，多くの測定をする際のバックグラウンドになる．そのため，初期の段階でデータをを用いた理解が必要となる．我々は， $W$  粒子と随伴生成するジェットを測定することで，



QCD 計算の信頼性を評価する．モンテカルロ計算として新しく開発した GR@PPA によるものを含め，ATLAS で標準的に用いられているものに対し， $W + n$ -jets の生成断面積や横運動量分布などを比較した．図 11 は 2 番目に横運動量の大きな jet の分布で  $W$  の発生数で異なるジェネレータでの結果を比較している．今後，実際のデータと比較することで，より信頼できるものを選定し QCD 過程の細部の調整を行う．このように QCD 過程を測定，理解していくことは，トップクォークや新しい物理過程の測定には不可欠である．

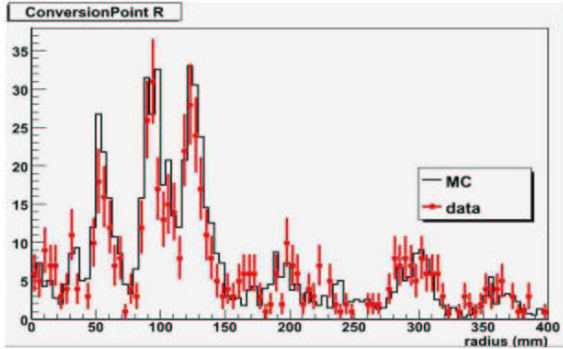


図 10:  $\gamma$  コンバージョン点の動径分布 (900 GeV データと MC の比較)

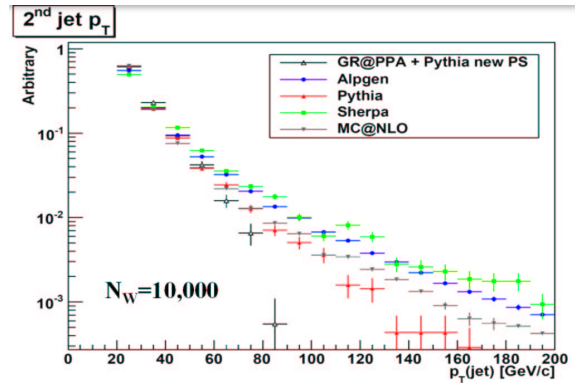


図 11:  $W + jets$  生成における 2 番目に横運動量の大きな jet の横運動量分布

現在， $\pi^0$ ， $K_s$ ， $\Lambda$ ， $\eta$ ， $J/\psi$  (図 12) などのハドロン粒子が再構成され，検出器の理解・調整が進められている．ATLAS の最初の物理論文として，900 GeV 陽子衝突で発生する平均荷電粒子数および横運動量分布を測定した (図 13)．図から明らかなように，いくつかの比較に用いたモンテカルロは総じて 5–15% 少なめの値を示し，横運動量分布も測定値の不定性を考慮してもずれていることが分かる．

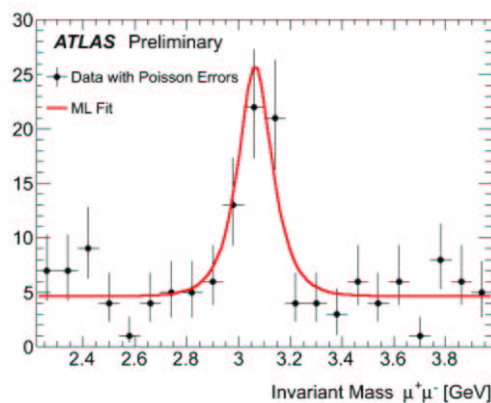


図 12:  $J/\psi$  粒子の  $\mu$  粒子対による再構成．

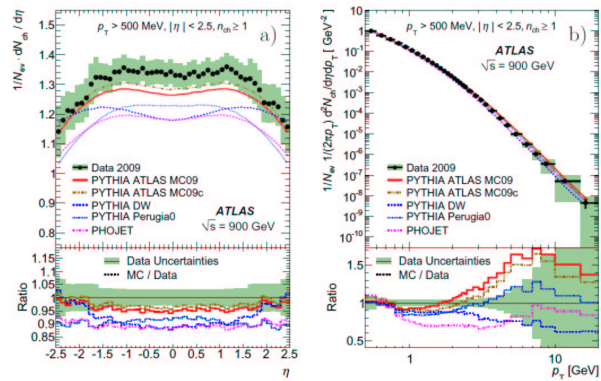


図 13: 重心系 900 GeV 陽子衝突による平均荷電粒子数の (a) 擬ラピディティおよび (b) 横運動量依存性．下段は測定値とモンテカルロとの比．

### (3) 放射線耐性に優れた P 型シリコンセンサーの開発

LHC の設計最大輝度は  $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  であるが，加速器を順次増強することで 2020 年頃までに輝度をさらに一桁上げる SuperLHC 実験が計画されている．それに伴い，ATLAS の

SCT 検出器もさらに放射線耐性に優れたものに交換する必要がある。

現行のセンサー基板には 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。そのため、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。

p 型基板を用いたマイクロストリップでは、可動電子層が蓄積しやすく電極間の信号分離を劣化させる。昨年度から引き続き、FZ 法による高抵抗の p 型シリコン基板を用いて、電極分離の構造を変えたセンサーを試作し、陽子線と中性子線を実際に照射し、放射線損傷の評価を行った。

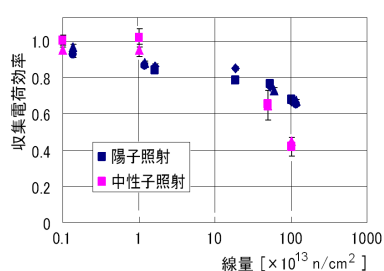


図 14: バイアス 500 V での収集電荷量の未照射時との比較。

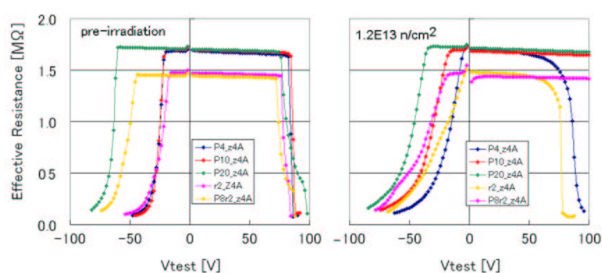


図 15: 実効的な電極・グランド間抵抗。センサー保護のため 100 V より低い電圧で抵抗が降下する設計を行っている。

図 14 は Sr  $\beta$  線を用いて測定した電荷収集量の照射量依存性を示す。放射線損傷によりキャリアが捕獲され、未照射よりも電荷収集量が劣化し、陽子と中性子照射で劣化の程度が多少異なることが分かった。SuperLHC で予測される放射線線量でもおよそ 50% の電荷収集が達成でき、十分な信号量が得られる。電子を収集する p 型センサーでは n 型の場合のホール収集よりも放射線による劣化が少ない。

ビームロスなどに起因する大電流が短時間に発生すると、一時的に電極電位が低下し、アンプにつながれたアルミ電極間にある酸化膜を破壊することが想定される。そのため、電極電位が低下した場合に、有効に電流を逃がす機構をパンチスルーを用いて設計した。図 15 は、電極電位を変えた場合の実効抵抗を測定したもので、酸化膜の耐圧 100 V よりも十分小さな電圧で抵抗は小さくなる。電極分離の方式により未照射では差異がみられるが、照射後はほとんど違いが現れない。

#### (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、埋め込み酸化膜 (BOX) 層をシリコン基板中に形成し、表層の薄いシリコン層に電子回路を作製した素子である。BOX 層下のシリコン基板を高抵抗の粒子検出部とした読み出し回路一体型ピクセルセンサーを実現するために、沖セミコンダクター社の  $0.20\mu\text{m}$  SOI プロセスを用いて、 $128 \times 128$  ピクセルセンサーを KEK の先端検出器開発室と共同で開発研究を行っている。

図 16 は、トランジスタ (PMOS/NMOS) の閾値電圧が放射線損傷により変動する様子

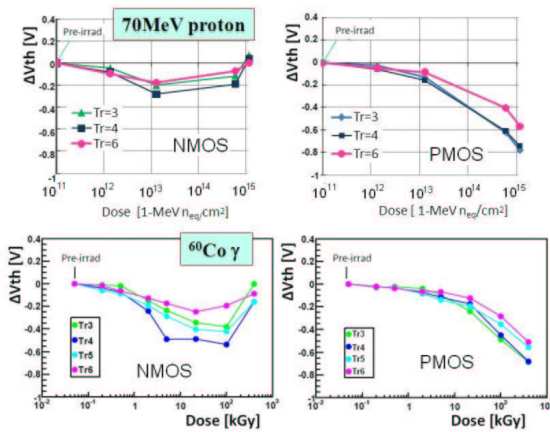


図 16: トランジスタ閾値電圧の放射線 ( 上段 : 70 MeV 陽子, 下段 :  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  ) 線量依存性 .

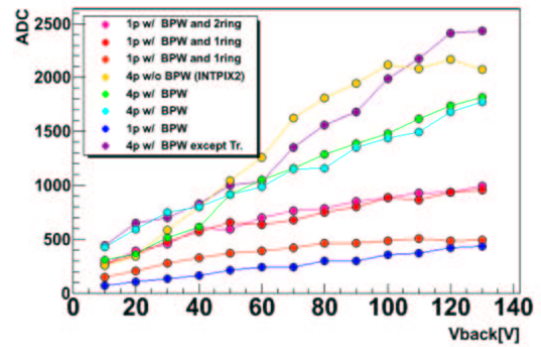


図 17: 1064 nm 赤外レーザーに対するピクセル応答のバイアス電圧依存性. 埋め込み p ウェルの構造の違いにより収集電荷量は異なるが, 130V まで収集量が増加する様子が分かる .

を示す . 陽子と  $\gamma$  線で電離放射線線量が一致するように図の横軸は揃えてあるので , 閾値変動が放射線の種類によらず酸化膜中のホール生成・蓄積により定性的に説明できることが理解できる . PMOS の閾値は単調に減少するのに対し , NMOS は一旦減少の後 , 高線量で反転するリバウンド効果を示し , これは酸化膜とシリコンとの界面に形成される電荷の符号の違いで説明できる . 測定した閾値電圧の変動を用いて , TCAD シミュレーションで酸化膜中の蓄積電荷を定量的に評価した .

SOI 一体型センサーでは , 裏面に加えたバイアス電圧の影響が BOX 層を介して表層の電子回路に現れ , 回路動作を変動させるバックゲート効果がある . センサー自体は電極形状の設計変更を経てバイアスを 140V まで印加できるものが作製できるようになったが , その電圧では読みだし回路が作動しない . そのため , BOX 層直下に p 型半導体を埋め込んだ電極 ( BPW ) を形成し , 外部電圧でその電圧を制御することでバックゲート効果を抑制することに成功した . 図 17 では , ピクセル周りの BPW 形状を変えたサンプルに対し , 赤外レーザーを照射して応答を測定した結果である . 従来 , 数 10V で顕著に応答が低下したが , 130V まで空乏化の広がりを反映して収集電荷量が増加することが初めて示された .

高エネルギー実験では , センサーを全空乏化した状態での動作が望ましく , そのためセンサーを 100  $\mu\text{m}$  まで薄くする試作を行った . 薄化には物質量を減らす効果もあるが , センサー裏面から光や軟 X 線を入射した場合に量子効率が一樣かつ高くできることが期待できる . 加工前後で暗電流の劣化もなく , 実際にピクセルセンサーとして光検出できることを示した .

### 【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 , 参加各国の大学や研究機関で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。

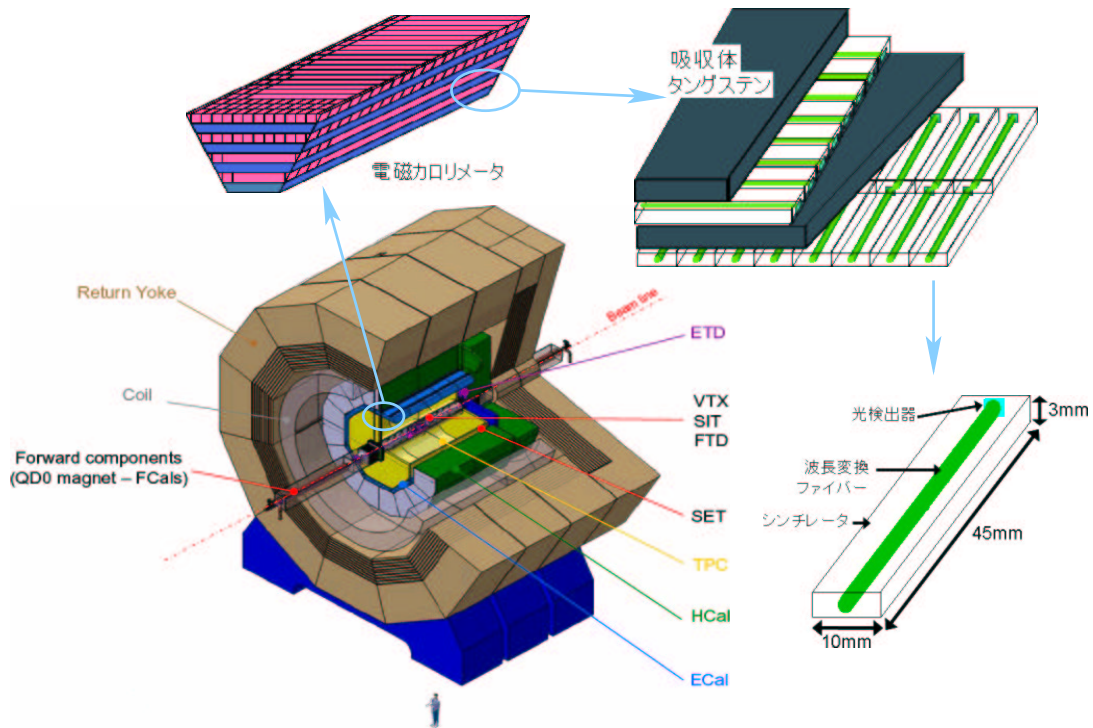


図 18: ILC(ILD) 検出器の構造，および電磁カロリメータのモジュールを一部取り出したもの．カロリメータは，吸収体とシンチレータ層をもつサンプリングカロリメータとなっており，シンチレータ層は，ストリップシンチレータを横方向と縦方向を交差させ並べた構造になっている．またストリップシンチレータは波長変換ファイバーが埋め込まれ，光検出器によって読み出される．

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 実験において検討される検出器候補のひとつ，ILD 検出器（図 18 左下）のうち，電磁カロリメータの研究開発を行なっている．ILD の電磁カロリメータでは，シンチレータとタングステン板を積層構造にし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 18 右上のように，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，信号頻度依存性などの基礎特性の測定を行ってきた．

昨年度(2009 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 の研究開発として，温度加速試験による MPPC の基礎特性の長期安定性の研究を行った．図 19

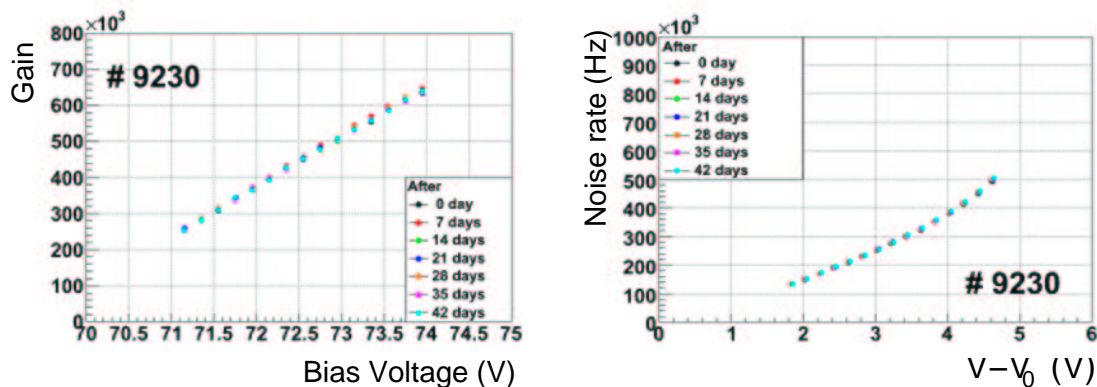


図 19: MPPC の基礎特性の長期安定性．温度加速試験 (85°C) での 42 日間 (11 年相当分) に渡る MPPC の増幅率のバイアス電圧依存性の変化 (左図)，および MPPC のノイズ発生率のバイアス電圧 (降伏電圧からの差) 依存性の変化 (右図)．

は，温度加速試験での 42 日間間の MPPC の増幅率のバイアス電圧依存性の変化 (左図)，および MPPC のノイズ発生率のバイアス電圧 (降伏電圧からの差) 依存性の変化 (右図) を示している．温度加速試験は，85°C で行われ，室温の約 11 年相当分にあたり，十分な長期安定性を有していることが分かる．

また，MPPC の特徴として，応答の線形性が MPPC を構成するピクセル数によって制限を受けることが挙げられる．より広範囲での線形性を得るため，応答の線形性のピクセル数依存性を調べた．1600 ピクセル，および 3136 ピクセルの MPPC でのレーザー光源による極短パルスに対する応答ピクセル数曲線を図 20 に示す．ピクセル数の増加にともない，線形な応答を示す領域が増加したことが分かる．

今後，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．

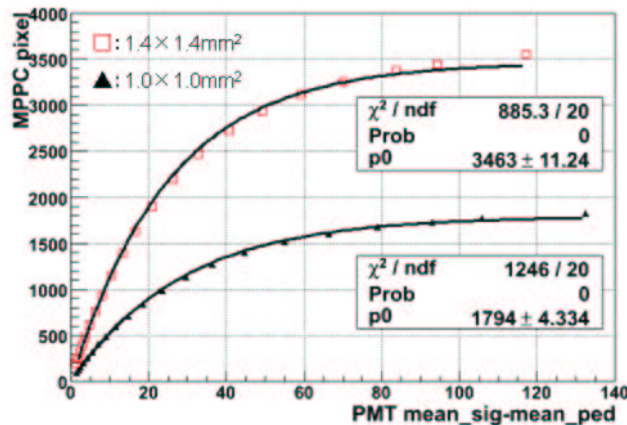


図 20: 1600 ピクセル，および 3136 ピクセルの MPPC でのレーザー光源による極短パルスに対する応答ピクセル数曲線．横軸は，光量のリファレンスとして光電子増倍管で MPPC への入射光を同時に測定した際の出力電荷．

#### 【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,  $T_c = 0.165$  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，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体検出器 (STJ) の開発を目指している．

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標としている．ニュートリノは，標準模型の枠内で重いニュートリノ ( $\nu_3$ ) から軽いニュートリノ ( $\nu_2$ ) 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放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上限として低エネルギー側だけに裾を引くスペクトル分布として観測される．この信号の検出に必要な検出器に対する要求は，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，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分かっている．

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できれば、Hf 膜のパターン加工例としては、世界初である。

検出器作成の残る技術的ステップは、安定した絶縁膜の作成条件であるが、現在、超伝導体部分に Nb、絶縁体部分に Hf を様々な条件で酸化して  $\text{HfO}_x$  の膜を使用した Nb-Hf STJ を作成し、実際に極低温下でのジョセフソン電流の測定を行うことにより、超伝導体-絶縁膜-超伝導体 (SIS) の構造ができているかどうかを検証し、絶縁膜作成条件の探索および最適化を行っている。

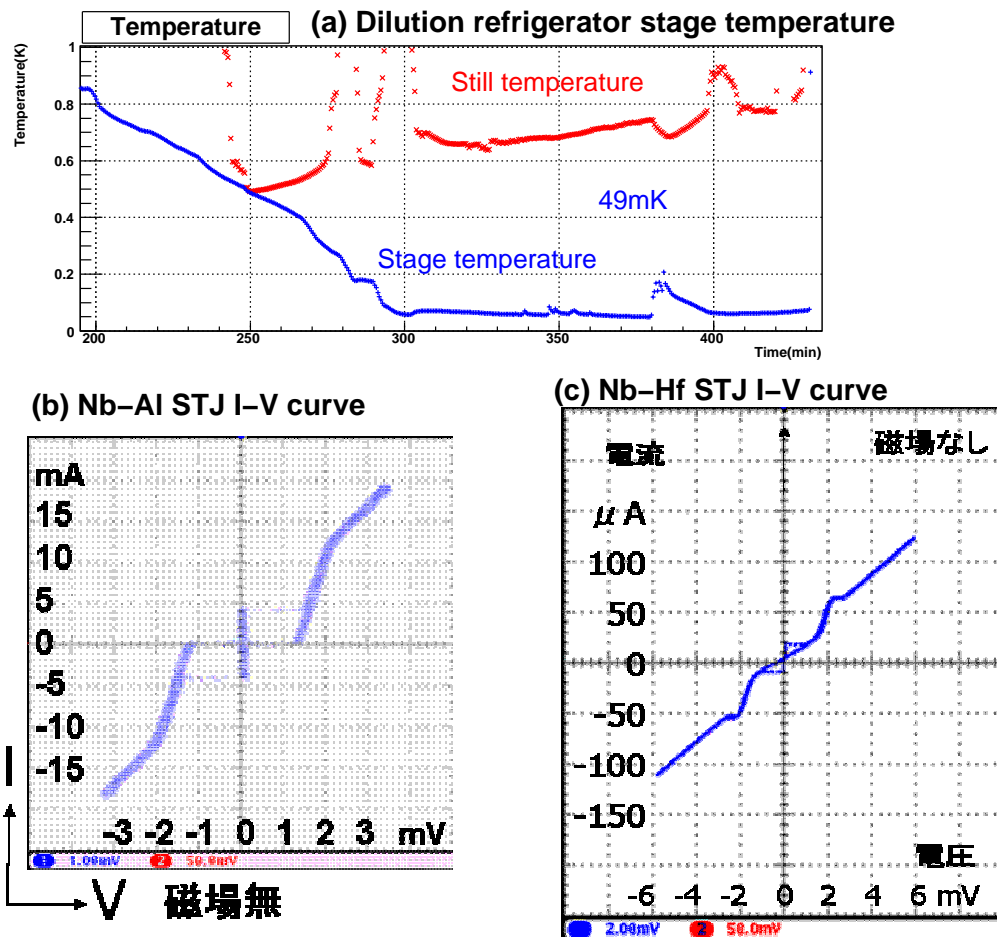


図 21: (a) 低温物性グループ (大塚研) より借用の希釈冷凍機の稼働状況。プロットは、最低温ステージの温度を時間の関数として表したもの。最低温で、49 mK を記録した。(b) Nb-Al STJ における I-V 曲線。V=0 で流れる電流は、絶縁体部分に磁場をかけることで消失し、ジョセフソン電流であることが確認できる。(c) Nb-Hf STJ における I-V 曲線。ジョセフソン電流が確認できるが、リーク電流が大きいため検出器として動作されるには、改善の必要がある。

測定には、最高でも Hf の転移温度 (160 mK) 以下の温度、更に検出器として実用的に運用するには、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 2009 年 7 月の試運転で、最低温 49 mK を達成した (図 21 a)。現在、更に低い温度での運転を目指し調整中である。更に、ファイバーを用いて実際に可視光～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。

また、ジョセフソン電流の測定環境も構築し、作成条件が確立している Nb-Al STJ を試料を作成し、実際にその I-V 応答曲線からジョセフソン電流を確認した (図 21 b)。

Nb-Hf STJ では、HfO<sub>x</sub> の作成条件によっては、ジョセフソン電流が確認でき、SIS の構造ができていることが予想されるが、まだまだリーク電流が大きいいため検出器として動作されるには、更に改善の必要がある (図 21 c)。

今後は、今年度中に、Hf STJ の実証テストを行い、光入力に対する応答を見ることを目指している。更に今後 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、宇宙赤外線背景放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。日本側研究代表者：受川 史彦)  
物件費：55,000 千円、旅費：11,500 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) 1,400 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) 700 千円

## 【6】 研究発表

### (1) 学会誌等への発表論文

1. “Global Search for New Physics with  $2.0 \text{ fb}^{-1}$  at CDF,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D **79**, 011101 (2009).



2. “Search for a Higgs Boson Decaying to Two  $W$  Bosons at CDF,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **102**, 021802 (2009).
3. “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).
4. “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).
5. “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).
6. “Direct Bound on the Total Decay 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).
7. “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).
8. “Measurement of the Fraction of  $t\bar{t}$  Production via Gluon-Gluon Fusion in  $p\bar{p}$  Collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D **79**, 031101 (2009).
9. “A Search for High-Mass Resonances Decaying to Dimuons at CDF,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **102**, 091805 (2009).
10. “Measurement of Resonance Parameters of Orbitally Excited Narrow  $B^0$  Mesons,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **102**, 102003 (2009).
11. “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).
12. “Search for New Physics in the  $\mu\mu + e/\mu + \cancel{E}_T$  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).
13. “Measurement of the  $t\bar{t}$  Production Cross section in  $2\text{ fb}^{-1}$  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), Phys. Rev. D **79**, 052007 (2009).
14. “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), Phys. Rev. D **79**, 052008 (2009).
15. “Inclusive Search for Squark and Gluino Production in  $p\bar{p}$  Collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **102**, 121801 (2009).

16. “Top Quark Mass Measurement in the Lepton plus Jets Channel Using a Modified Matrix Element Method,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D **79**, 072001 (2009).
17. “Measurement of the Top Quark Mass with Dilepton Events Selected Using Neuroevolution at CDF,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **102**, 152001 (2009).
18. “Measurement of the Top Quark Mass at CDF Using the “Neutrino  $\phi$  Weighting” Template Method on a Lepton Plus Isolated Track Sample,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D **79**, 072005 (2009).
19. “Search for Top-Quark Production via Flavor-Changing Neutral Currents in  $W+1$  Jet Events at CDF,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **102**, 151801 (2009).
20. “Top Quark Mass Measurement in the  $t\bar{t}$  All Hadronic Channel Using a Matrix Element Technique in  $p\bar{p}$  Collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D **79**, 072010 (2009).
21. “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), Phys. Rev. Lett. **102**, 181801 (2009).
22. “Measurement of the  $b$ -Hadron Production Cross Section Using Decays to  $\mu^- D^0 X$  Final States in  $p\bar{p}$  Collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D **79**, 092003 (2009).
23. “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), Phys. Rev. Lett. **102**, 201801 (2009).
24. “First Simultaneous Measurement of the Top Quark Mass at CDF II in the Lepton+Jets and Dilepton Channels at CDF,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D **79**, 092005 (2009).
25. “Search for New Particles Decaying into Dijets in Proton-Antiproton Collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D **79**, 112002 (2009).
26. “Search for Gluino-Mediated Bottom Squark Production in  $p\bar{p}$  Collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **102**, 221801 (2009).
27. “Search for Exclusive  $Z$ -Boson Production and Observation of High Mass  $p\bar{p} \rightarrow p\gamma\gamma\bar{p} \rightarrow p\ell^+\ell^-\bar{p}$  Collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **102**, 222002 (2009).
28. “First Measurement of the  $t\bar{t}$  Differential Cross Section  $d\sigma/dM_{t\bar{t}}$  in  $p\bar{p}$  at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **102**, 222003 (2009).

29. “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), Phys. Rev. Lett. **102**, 232002 (2009).
30. “Measurement of Particle Production and Inclusive Differential Cross Sections in  $p\bar{p}$  Collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D **79**, 112005 (2009).
31. “A Measurement of the  $t\bar{t}$  Cross Section in  $p\bar{p}$  Collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV using Dilepton Events with a Lepton plus Track Selection,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D **79**, 112007 (2009).
32. “Observation of Exclusive Charmonium Production and  $\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$  in  $p\bar{p}$  Collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **102**, 242001 (2009).
33. “Measurement of the Ratio of Branching Fractions  $\mathcal{B}(B^+ \rightarrow J/\psi\pi^+)/\mathcal{B}(B^+ \rightarrow J/\psi K^+)$ ,”  
A. Abulencia *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D **79**, 112003 (2009).
34. “Evidence for a Narrow Near-Threshold Structure in the  $J/\psi\phi$  Mass Spectrum in  $B^+ \rightarrow J/\psi\phi K^+$  Decays,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **102**, 242002 (2009).
35. “Search for  $WW$  and  $WZ$  Production in Leptons Plus Jets Final State at CDF,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D **79**, 112011 (2009).
36. “Search for Long-Lived Massive Charged Particles in 1.96 TeV  $p\bar{p}$  Collisions,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **103**, 021802 (2009).
37. “Search for Standard Model Higgs Boson Production in Association with a  $W$  Boson using a Neural Network Discriminant at CDF,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D **80**, 012002 (2009).
38. “Observation of the New Charmless Decays of Bottom Hadrons,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **103**, 031801 (2009).
39. “Search for the Production of Narrow  $t\bar{b}$  Resonances in  $1.9 \text{ fb}^{-1}$  of  $p\bar{p}$  Collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **103**, 041801 (2009).
40. “Searching the Inclusive  $\ell\gamma \cancel{E}_T + b$ -quark Signature for Radiative Top Quark Decay and Non-Standard-Model Processes,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D **80**, 011102 (2009).
41. “Search for a Fermiophobic Higgs Boson Decaying into Diphotons in  $p\bar{p}$  Collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **103**, 061803 (2009).



42. “Search for Narrow Resonances Lighter than  $\Upsilon$  Mesons,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), *Eur. Phys. J. C* **52**, 319 (2009).
43. “Production of  $\psi(2S)$  Mesons in  $p\bar{p}$  Collisions at 1.96 TeV,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), *Phys. Rev. D* **80**, 031103 (2009).
44. “Observation of Electroweak Single Top Quark Production,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **103**, 092002 (2009).
45. “First Observation of Vector Boson Pairs in a Hadronic Final State at the Tevatron Collider,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **103**, 091803 (2009).
46. “Search for a Standard Model Higgs Boson in  $WH \rightarrow \ell\nu b\bar{b}$  in  $p\bar{p}$  Collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **103**, 101802 (2009).
47. “Search for Charged Higgs Bosons in Decays of Top Quarks in  $p\bar{p}$  Collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **103**, 101803 (2009).
48. “Measurement of the Top Quark Mass Using the Invariant Mass of Lepton Pairs in Soft Muon  $b$ -tagged Events,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), *Phys. Rev. D* **80**, 051104 (2009).
49. “Search for the Neutral Current Top Quark Decay  $t \rightarrow Zc$  Using Ratio of  $Z$ -Boson + 4 jets to  $W$ -Boson + 4 Jets Production,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), *Phys. Rev. D* **80**, 052001 (2009).
50. “Search for Anomalous Production of Events with a Photon, Jet,  $b$ -quark Jet, and Missing Transverse Energy,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), *Phys. Rev. D* **80**, 052003 (2009).
51. “Search for Hadronic Decays of  $W$  and  $Z$  Bosons in Photon Events in  $p\bar{p}$  Collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), *Phys. Rev. D* **80**, 052011 (2009).
52. “Precision Measurement of the  $X(3872)$  Mass in  $J/\psi\pi^+\pi^-$  Decays,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **103**, 152001 (2009).
53. “Observation of the  $\Omega_b^-$  and Measurement of the Properties of the  $\Xi_b^-$  and  $\Omega_b^-$  Baryons,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), *Phys. Rev. D* **80**, 072003 (2009).
54. “A Search for the Higgs Boson Produced in Association with  $Z \rightarrow \ell^+\ell^-$  Using the Matrix Element Method in CDF II,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), *Phys. Rev. D* **80**, 071101 (2009).

55. “First Observation of  $\overline{B}_s^0 \rightarrow D_s^\pm K^\mp$  and Measurement of the Ratio of Branching Fractions  $\mathcal{B}(\overline{B}_s^0 \rightarrow D_s^\pm K^\mp)/\mathcal{B}(\overline{B}_s^0 \rightarrow D_s^\pm \pi^\mp)$ ,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **103**, 191802 (2009).
56. “Search for Higgs Bosons Predicted in Two-Higgs-Doublet Models via Decays to Tau Lepton Pairs in 1.96 TeV  $p\bar{p}$  Collisions,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **103**, 201801 (2009).
57. “A Search for the Associated Production of the Standard-Model Higgs Boson in the All-Hadronic Channel,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **103**, 221801 (2009).
58. “Measurement of the Inclusive Isolated Prompt Photon Cross Section in  $p\bar{p}$  Collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV using the CDF Detector,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D **80**, 111106 (2009).
59. “Search for Supersymmetry with Gauge-Mediated Breaking in Diphoton Events with Missing Transverse Energy at CDF II,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **104**, 011801 (2010).
60. “Measurement of  $d\sigma/dy$  of Drell-Yan  $e^+e^-$  Pairs in the  $Z$  Mass Region from  $p\bar{p}$  Collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration),  
arXiv:0908.3914 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
61. “Measurement of the  $b$ -jet Cross Section in Events with a  $W$  Boson in  $p\bar{p}$  Collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration),  
arXiv:0909.1505 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
62. “Measurements of the Top-Quark Mass using Charged Particle Tracking,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:0910.0969 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. D)
63. “Search for Anomalous Production of Events with Two Photons and Additional Energetic Objects at CDF,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:0910.5170 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. D)
64. “Measurement of Branching Fraction Ratios and  $CP$  Asymmetries in  $B^\pm \rightarrow D_{CP}K^\pm$  Decays in Hadron Collisions,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:0911.0425 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. D)
65. “Search for New Color-Octet Vector Particle Decaying to  $t\bar{t}$  in  $p\bar{p}$  Collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV,”  
arXiv:0911.3112 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Lett. B)

66. T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration),  
 “Measurement of the Top Quark Mass in the Dilepton Channel using  $m_{T2}$  at CDF,”  
 T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:0911.2956 [hep-ex]. (Submitted to  
 Phys. Rev. D)
67. “A Search for the Higgs Boson Using Neural Networks in Events with Missing Energy  
 and  $b$ -quark Jets in  $p\bar{p}$  Collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV,”  
 T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:0911.3935 [hep-ex]. (Submitted to  
 Phys. Rev. Lett.)
68. “Measurement of the  $WW+WZ$  Production Cross Section Using the Lepton + Jets  
 Final State at CDF II,”  
 T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:0911.4449 [hep-ex]. (Submitted to  
 Phys. Rev. Lett.)
69. “Search for Fermion-Pair Decays  $Q\bar{Q} \rightarrow (tW^\mp)(\bar{t}W^\pm)$  in Same-Charge Dilepton  
 Events,”  
 T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:0912.1057 [hep-ex]. (Submitted to  
 Phys. Rev. Lett.)
70. “Search for Pair Production of Supersymmetric Top Quarks in Dilepton Events from  
 $p\bar{p}$  Collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV,”  
 T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:0912.1308 [hep-ex]. (Submitted to  
 Phys. Rev. Lett.)
71. “Search for Technicolor Particles Produced in Association with a  $W$  Boson at CDF,”  
 T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:0912.2059 [hep-ex]. (Submitted to  
 Phys. Rev. Lett.)
72. “A Study of the Associated Production of Photons and  $b$ -quark Jets in  $p\bar{p}$  Collisions  
 at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV,”  
 T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:0912.3453 [hep-ex]. (Submitted to  
 Phys. Rev. Lett.)
73. “Measurement of the  $\Lambda_b^0$  Lifetime in  $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+ \pi^-$  in  $p\bar{p}$  Collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV,”  
 T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:0912.3566 [hep-ex]. (Submitted to  
 Phys. Rev. Lett.)
74. “Measurement of the  $W^+W^-$  Production Cross Section and Search for Anomalous  
 $WW\gamma$  and  $WWZ$  Couplings in  $p\bar{p}$  Collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV,”  
 T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:0912.4500 [hep-ex]. (Submitted to  
 Phys. Rev. Lett.)
75. “Search for New Physics with a Dijet plus Missing  $E_T$  Signature in  $p\bar{p}$  Collisions at  
 $\sqrt{s} = 1.96$  TeV,”  
 T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:0912.4691 [hep-ex]. (Submitted to  
 Phys. Rev. Lett.)

76. “Inclusive Search for Standard Model Higgs Boson Production in the  $WW$  Decay Channel using the CDF II Detector,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1001.4468 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
77. “Combination of Tevatron Searches for the Standard Model Higgs Boson in the  $W^+W^-$  Decay Mode,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF and D0 Collaborations), arXiv:1001.4162 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
78. “Search for Single Top Quark Production in  $p\bar{p}$  Collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV in the Missing Transverse Energy Plus Jets Topology,”  
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1001.4577 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. D)
79. 金 信弘, 増淵 達也, “テバトロン実験でヒッグス粒子にどこまで迫れるか,”  
日本物理学会誌 第 64 巻 第 6 号, p. 440 (2009).
80. “Charged-particle multiplicities in pp interactions at  $\sqrt{s} = 900$  GeV measured with the ATLAS detector at the LHC”,  
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, M. Kurata, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Lett. **B 688** 21-42 (2010).
81. “Radiation Resistance of SOI Pixel Devices Fabricated with OKI 0.15  $\mu\text{m}$  FD-SOI Technology”,  
K. Hara, H. Miyake *et al.*, IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol.56-5, 2896-2904 (2009).
82. “Development of Radiation Hard N-on-P Silicon Microstrip Sensors for Super LHC”,  
K. Hara *et al.*, IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol.56-2, 468-473 (2009).

## (2) 学会・研究会での講演 (国内)

1. 受川 史彦: “ $B$  実験の紹介: CDF での  $B$  粒子の物理,”  
関東甲信越地方  $B$  中間子の物理実験研究会 (2009 年 8 月 31 日), 東京大学.
2. 戸村 友宣: “CDF 実験のトップクォークの物理と新粒子探索の結果” (招待講演),  
日本物理学会 2009 年秋季大会 (2009 年 9 月 10 日–13 日), 甲南大学.
3. 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 2009 年秋季大会 (2009 年 9 月 10 日–13 日), 甲南大学.
4. 橋本 就吾: “CDF 実験プラグ部電磁カロリメータ用光電子増倍管の長期安定性の研究,”  
日本物理学会 2009 年秋季大会 (2009 年 9 月 10 日–13 日), 甲南大学.
5. 佐藤 構二: “CDF の最新結果,”  
科研費特定領域研究「フレーバー物理の新展開」研究会 2010 (2010 年 2 月 22 日–24 日), 茨城県東茨城郡.

6. 三宅 秀樹：“CDF での  $B$  の物理,”  
科研費特定領域研究「フレーバー物理の新展開」研究会 2010 (2010 年 2 月 22 日–24 日), 茨城県東茨城郡.
7. 永井 義一：“CDF でのヒッグス粒子探索,”  
科研費特定領域研究「フレーバー物理の新展開」研究会 2010 (2010 年 2 月 22 日–24 日), 茨城県東茨城郡.
8. 須藤 裕司：“Higgs Search in the  $H \rightarrow WW \rightarrow \ell\nu$  jet jet channel,”  
科研費特定領域研究「フレーバー物理の新展開」研究会 2010 (2010 年 2 月 22 日–24 日), 茨城県東茨城郡.
9. 武政 健一：“Top spin correlations in lepton + jets channel,”  
科研費特定領域研究「フレーバー物理の新展開」研究会 2010 (2010 年 2 月 22 日–24 日), 茨城県東茨城郡.
10. 深見 智代：“CDF-TOF 用光電子増倍管の時間分解能の長期安定性,”  
科研費特定領域研究「フレーバー物理の新展開」研究会 2010 (2010 年 2 月 22 日–24 日), 茨城県東茨城郡.
11. 橋本 就吾：“CDF 実験プラグ部電磁カロリメータ用光電子増倍管の長期安定性の研究,”  
科研費特定領域研究「フレーバー物理の新展開」研究会 2010 (2010 年 2 月 22 日–24 日), 茨城県東茨城郡.
12. 永井 義一：“1.96 TeV 陽子反陽子衝突実験 CDF における  $W$  ボソン随伴生成のヒッグス粒子探索,”  
日本物理学会 第 65 回年次大会 (2010 年 3 月 20 日–23 日), 岡山大学.
13. 林隆康:GRA@PPA イベントジェネレータを用いた LHC-ATLAS 実験における  $W$ +jets 事象の研究,  
日本物理学会 2009 年秋季大会 (2009 年 10 月 10 日–13 日), 甲南大学.
14. 塙慶太: ATLAS 実験内部飛跡検出器の飛跡再構成精度,  
日本物理学会 2009 年秋季大会 (2009 年 10 月 10 日–13 日), 甲南大学.
15. 瀬賀智子: SOI pixel 検出器におけるバックゲート効果の埋め込み P ウェルによる抑制,  
日本物理学会 2009 年秋季大会 (2009 年 10 月 10 日–13 日), 甲南大学.
16. 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 (TCAD による放射線損傷の研究),  
日本物理学会 2009 年秋季大会 (2009 年 10 月 10 日–13 日), 甲南大学.
17. 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 2009 年秋季大会 (2009 年 10 月 10 日–13 日), 甲南大学.
18. 三井信吾: SLHC 用 P 型シリコン飛跡検出器の放射線によるバルク部損傷の評価,  
日本物理学会 2009 年秋季大会 (2009 年 10 月 10 日–13 日), 甲南大学.

19. 林隆康：LHC-ATLAS 実験で用いられるイベントジェネレータの  $W$ +jets 事象を用いた比較，  
日本物理学会第 65 回年次大会（2010 年 3 月 20 日–23 日），岡山大学.
20. 松隈恭子： $\gamma$  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 65 回年次大会（2010 年 3 月 20 日–23 日），岡山大学.
21. 埴慶太：ATLAS 実験内部飛跡検出器の飛跡再構成精度，  
日本物理学会第 65 回年次大会（2010 年 3 月 20 日–23 日），岡山大学.
22. 瀬賀智子：埋め込み P ウェル構造をもつ SOI pixel 検出器の放射線耐性試験，  
日本物理学会第 65 回年次大会（2010 年 3 月 20 日–23 日），岡山大学.
23. 河内山真美：SOI ピクセル検出器における回路部トランジスタの放射線損傷評価 (TCAD によるシミュレーション)，  
日本物理学会第 65 回年次大会（2010 年 3 月 20 日–23 日），岡山大学.
24. 高橋優：SLHC 実験に用いる高放射線耐性 P 型マイクロストリップセンサーの開発，  
日本物理学会第 65 回年次大会（2010 年 3 月 20 日–23 日），岡山大学.
25. 原和彦：ATLAS 実験用シリコン半導体検出器の放射線損傷試験，  
サイクロトロンラジオアイソトープセンター第 30 回研究報告会（2009 年 11 月 24 日–25 日），東北大学.
26. 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 2009 年秋季大会（2009 年 10 月 10 日–13 日），甲南大学.
27. 金海英：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 2009 年秋季大会（2009 年 10 月 10 日–13 日），甲南大学.
28. 木内健司：ニュートリノ崩壊検出のためのハフニウム超伝導トンネル接合素子の開発，  
日本物理学会第 65 回年次大会（2010 年 3 月 20 日–23 日），岡山大学.
29. 高橋優介：ILC カロリメータに用いる光検出器 MPPC の長期安定性試験，  
日本物理学会第 65 回年次大会（2010 年 3 月 20 日–23 日），岡山大学.
30. 武内勇司：Hf-STJ 前回報告よりの進展，  
KEK 測定器開発室月例会議 (2009 年 8 月 11 日)，高エネルギー加速器研究機構

### (3) 国際会議・研究会での講演・ポスター発表

1. Yoshikazu Nagai, “Search for a Higgs Boson Produced in Association with  $W$  Boson using a Neural Network Approach at CDF”,  
American Physical Society April Meeting, May 2–5, 2009, Denver, Colorado, USA.
2. Hideki Miyake, “Rare Decays/ $B_s$  CPV Measurements at Tevatron”,  
XXth Hadron Collider Physics Symposium 2009, November 16–20, 2009, Evian, France.

3. Hideki Miyake, “Measurement of Forward-Backward Asymmetry in  $B \rightarrow K^{(*)}\mu\mu$  and Search for  $B_s^0 \rightarrow \phi\mu\mu$  at the CDF Experiment”, American Physical Society April Meeting, February 13–16, 2010, Washington, D.C., USA.
4. Yuji Takeuchi, “Tevatron – Top/Higgs”, KEK Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology (KEK-PH2010), February 18–20, 2010, High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba, Japan.
5. Hideki Miyake, “Tevatron – Bottom quark”, KEK Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology (KEK-PH2010), February 18–20, 2010, High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba, Japan.
6. Kazuhiko Hara, “ATLAS Commissioning and Early Physics - resonance and jet production - ”, 5-th International Conference on Quarks and Nuclear Physics, Beijing China, Sep. 21–26, 2009.
7. Kazuhiko Hara, “Testing of bulk radiation damage of n-in-p silicon sensors for very high radiation environments ”, 7th Internatinal Symposium on Development and Applicatons of Semiconductor Tracking Devices, Hiroshima, Japan, Aug.29–Sep.1, 2009.
8. Mami Kochiyama and Tomoko Sega, “ Radiation Effects in OKI SOI Pixel Devices”, 7th Internatinal Symposium on Development and Applicatons of Semiconductor Tracking Devices, Hiroshima, Japan, Aug.29–Sep.1, 2009.
9. Yuji Sudo, “SCECAL beam test results”, Joint ACFA Physics and Detector Workshop and GDE Meeting on International Linear Collider (TILC09), Tsukuba, Japan, Apr. 17 – 21, 2009.
10. Yuji Sudo, “ Study of the Multi-Pixel Photon Counter for the ILC Scintillator-Strip Calorimeter” , International Workshop on New Photon Detectors PD09 Shinshu University, Japan, June 24–26, 2009 .
11. Yoshikazu Nagai, “Combined  $WH \rightarrow \ell\nu b\bar{b}$  Search at CDF,” (poster presentation) Fermilab Users’ Meeting, June 3–4, 2009, Batavia, Illinois, USA.

#### (4) 会議・研究会報告書

1. N. Kimura, “Measurement of the relative fraction of the gluon-gluon fusion in top-antitop production process at 1.96 TeV proton-antiproton collisions using CDF,” Proceedings of the XLIV Rencontres de Moriond on Electroweak Interactions and Unified Theories, March 2009.

2. S. Lindgren, K. Hara, *et al.*, “Interstrip Characteristics of n-on-p FZ Silicon Detectors”,  
IEEE Nucl. Science Symposium CR N08-2, Orlando, FL., USA, Oct. 25-31, 2009.
3. Y. Ikegami, K. Hara, *et al.*, “Performance of Low-Mass and high Thermal Conductivity Hybrid for High Track Density Environment”,  
IEEE Nucl. Science Symposium CR N13-174, Orlando, FL., USA, Oct. 25-31, 2009.
4. Y. Sudo, “Study of the Multi Pixel Photon Counter for the ILC Scintillator-Strip Calorimeter”, Proceedings of Science (PD09)005, June 2009.

## (5) 学位論文

### 博士論文

1. 永井 義一 : Search for the Standard Model Higgs Boson in the  $WH \rightarrow \ell\nu b\bar{b}$  Channel 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  $WH \rightarrow \ell\nu b\bar{b}$  過程のヒッグス粒子探索 )  
筑波大学大学院数理物質科学研究科物理学専攻, 2010 年 2 月.

### 修士論文

筑波大学大学院数理物質科学研究科物理学専攻, 2010 年 2 月 .

1. 河内山 真美 : TCAD シミュレーションによる SOI ピクセル検出器の放射線損傷評価
2. 瀬賀 智子 : 埋め込み p 型ウェル構造をもつ SOI ピクセル検出器の放射線耐性の研究
3. 高橋 優介 : リニアコライダー実験用細分割カロリメータに用いられる光検出器 MPPC の長期安定性の研究
4. 埴 慶太 :  $Z^0$  ボソン崩壊事象を用いた ATLAS 内部飛跡検出器の運動量再構成精度の評価
5. 林 隆康 : ATLAS 実験における  $W+\text{jets}$  事象のシミュレーションによる研究
6. 深見 智代 : CDF 実験 TOF 測定器に用いられる光電子増倍管の長期耐久性の研究
7. 松隈 恭子 : 光子コンバージョン事象を用いた ATLAS 内部日席検出器の物質量評価
8. 三井 真吾 : Super-LHC 用 p 型シリコンマイクロストリップセンサーのバルク部の放射線損傷
9. 山田 美帆 : Super-LHC 用 p 型シリコンマイクロストリップセンサーの陽子線・線照射による放射線損傷の評価
10. 金 海英 : 遠赤外線光子検出のための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



## (6) 研究会の主催

1. 科学研究費特定領域「フレーバー物理の新展開」第4回研究会  
茨城県東茨城郡大洗町 オーシャンビュー大洗，2010年2月22－24日．

## 【構成員の異動】

1. 2009年9月に佐藤構二が講師として着任．
2. 2010年1月に永井康一が研究員として着任．