

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, 永井 義一, 戸村 友宣
大学院生	17 名
学群 4 年次生	5 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, 欧州の計 14ヶ国の研究機関・大学からなる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 $\mathcal{L} = 4.0 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ が達成されており設計値 $10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 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} , 全積分ルミノシティは 11.2 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 9.3 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

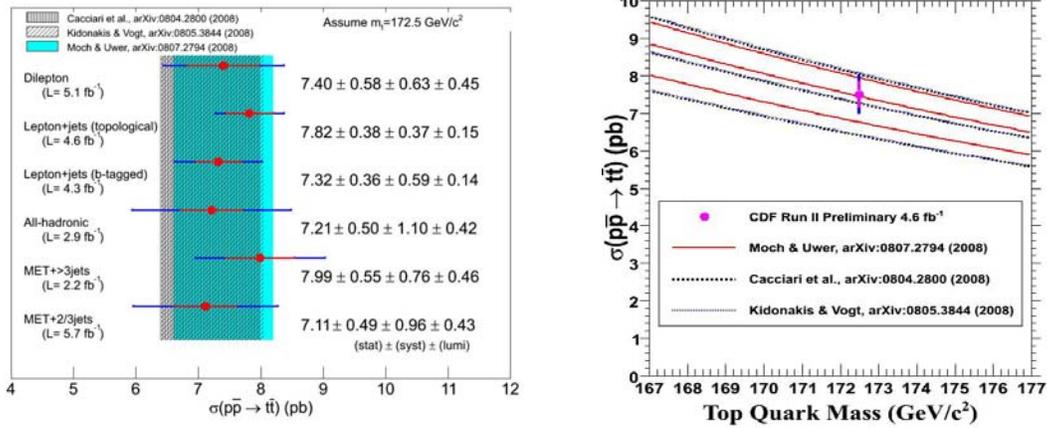


図 1: 左: CDF 実験におけるトップクォークの対生成断面積の測定一覧. 右: 生成断面積の質量依存性.

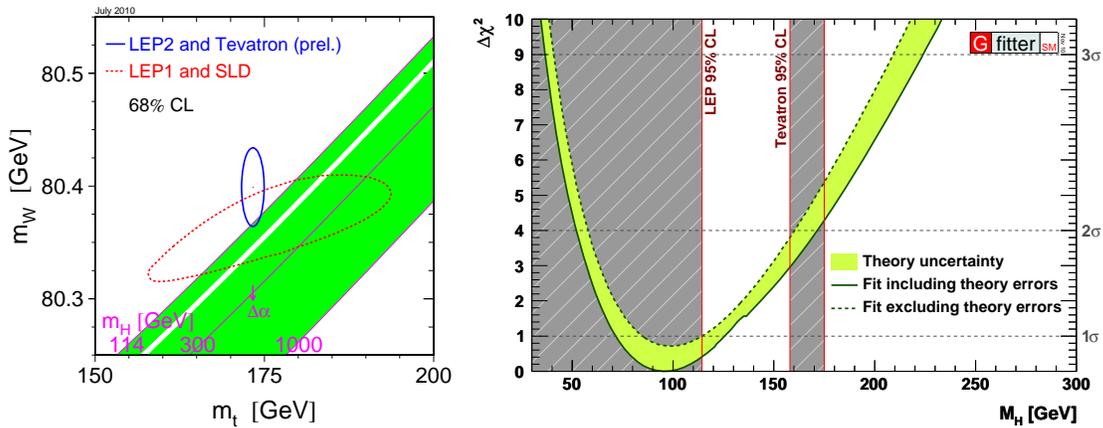


図 2: 左: W ボソンとトップクォークの質量の測定. 右: ヒッグス粒子の質量に対する制限.

ある. その生成断面積は, 最大 5.1 fb^{-1} 相当のデータと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, $\sigma(\bar{p}p \rightarrow t\bar{t}X) = 7.50 \pm 0.31 \pm 0.34 \pm 0.15 \text{ pb}$ 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.

質量の測定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, 他実験も含むすべての測定の平均値は $173.1 \pm 0.6 \pm 0.9 \text{ GeV}/c^2$ 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ことができる. 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) $m_{\text{Higgs}} = 95.7^{+30.6}_{-24.2} \text{ GeV}/c^2$ (68% CL) および $m_{\text{Higgs}} < 171.5 \text{ GeV}/c^2$ (95% CL) を得た.

その他, 2010 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機構の解明がある.

陽子・反陽子衝突におけるトップクォーク対生成は, クォーク・反クォークを始状態とする素過程とグルオン・グルオンを始状態とするものがある. $t\bar{t}$ 系の角運動量は $|1, \pm 1\rangle$ となる. いずれも強い相互作用による反応であり, 強い相互作用はパリティを保存することが

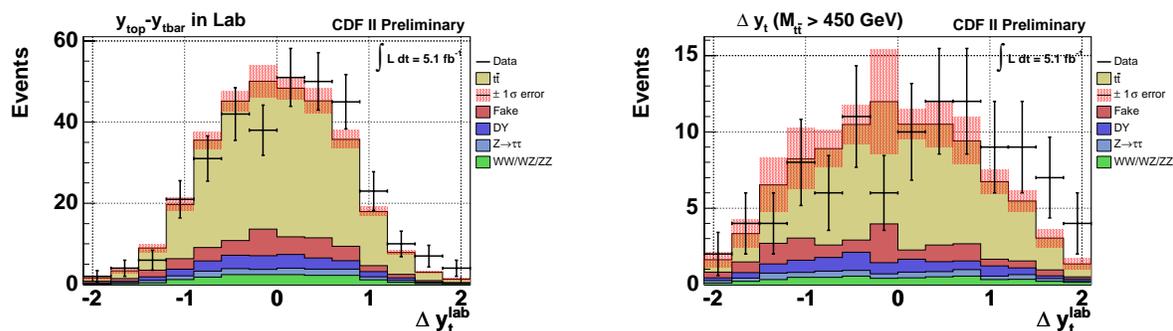


図 3: $t\bar{t}$ 対生成における前後方非対称度の測定. $t\bar{t}$ 対の質量 $m_{t\bar{t}}$ について, 全領域 (左) と高質量領域 $m_{t\bar{t}} > 450 \text{ GeV}/c^2$ (右) における結果.

ら, パートの重心系における t クォークの飛翔方向は, 前後方対称性を持つと期待される. これは相互作用の最低次の過程を考える限り真であるが, 実際には, 高次の項との干渉により強い相互作用の標準理論の枠内でも 10% 程度の前後方非対称度が現れることが予想される. 標準理論を超える物理で軸性ベクトル結合を含むような新たな相互作用を考えれば, 非対称度は予想と大きく異なる可能性もある.

2010 年度には, 5.1 fb⁻¹ 相当のデータを解析し, dilepton チャンネルを用いて初めてこの前後方非対称度を測定した. 実験的には t および \bar{t} クォークのラピディティ y の差 Δy_t を測定するのが便利である. この分布を図 3 に示す. 非対称度の測定値は $A_{\text{FB}} = +0.14 \pm 0.05$ (図左) である. $t\bar{t}$ 対の質量 $m_{t\bar{t}}$ について, 高質量領域 $m_{t\bar{t}} > 450 \text{ GeV}/c^2$ (図右) を見ると, 非対称度は $A_{\text{FB}} = +0.212 \pm 0.096$ と, より大きくなる. これらは背景事象の寄与を含む. 補正後の値は, $A_{\text{FB}} = +0.42 \pm 0.15 \pm 0.05$ であり, 非対称度がない場合から 2.6 標準偏差, 予言値 $+0.06$ から 2.3 標準偏差だけ異なる.

Lepton plus jets チャンネルを用いた測定も同じ傾向を示しており, 新たな物理の探索の観点から興味深い.

(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 $b \rightarrow sl^{+}l^{-}$ は, いわゆる flavor-changing neutral current による崩壊であり, 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が得られた.

現在, より多くのデータの解析と, 信号再構成のための新たなトリガーと崩壊様式を用いることにより, より感度のよい測定を行っており, 近くその結果が得られる予定である.

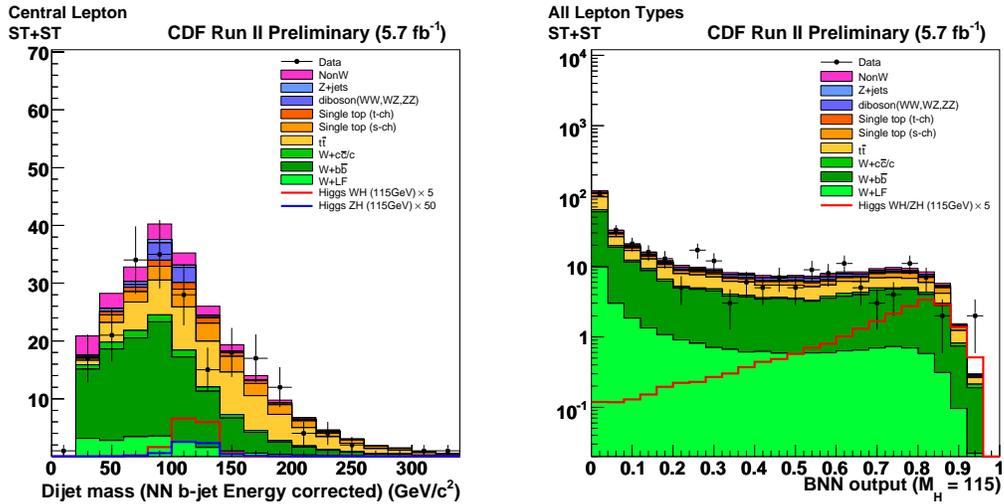


図 4: $p\bar{p} \rightarrow WHX \rightarrow \ell\nu b\bar{b}X$ 過程によるヒッグス粒子の探索．左：二次崩壊点を用いて同定した $b\bar{b}$ ジェット対の質量分布．右：人工ニューラルネットワークを用いた信号と背景事象の分離．

これにより，Belle 実験を上回る精度が得られる見込みであり，標準理論の検証および新物理の探索に寄与する．

(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 4（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 4（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 5

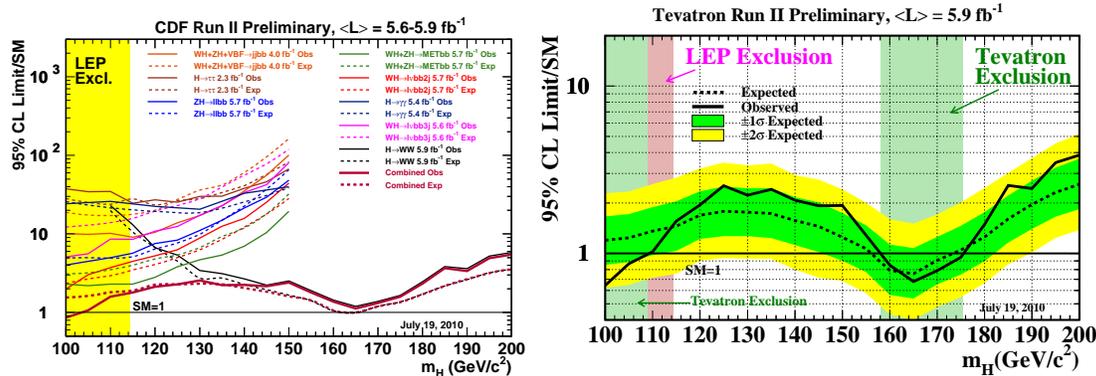


図 5: 標準模型ヒッグス粒子探索の結果．生成断面積の上限（観測値）の理論値に対する比を質量の関数として示したもの．左：CDF 実験の結果，右：CDF 実験と D0 実験の結果を総合したもの．

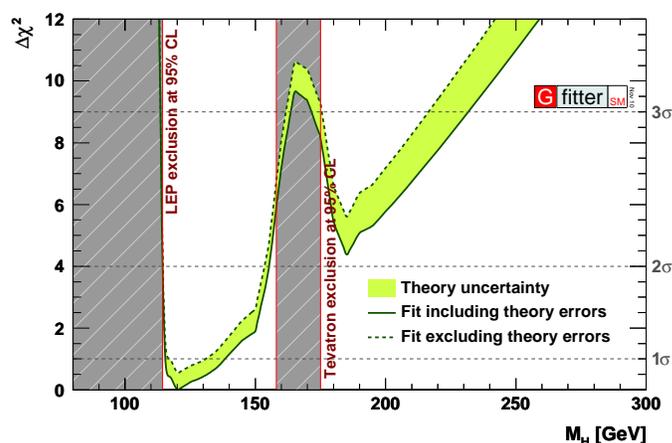


図 6: 標準模型ヒッグス粒子探索の質量に対する制限．間接探索と直接探索の結果を総合したもの．

（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 2 倍程度であり，質量 $160 \text{ GeV}/c^2$ 近辺ではほぼ予言値に等しい．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．質量領域 $M_{\text{Higgs}} < 109 \text{ GeV}/c^2$ および $158 < M_{\text{Higgs}} < 175 \text{ GeV}/c^2$ では実験的に得られた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 6 に示す．比較的軽いヒッグス粒子が示唆されており，今後の研究の進展が待たれる．

以上に 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 年度末をもつての運転の終了が決定したが，それ以降も数年は物理解析を継続する．最終的に 12 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 LHC 加速器 (Large Hadron Collider) は, 2010 年 3 月末に重心系エネルギー 7 TeV での陽子陽子衝突を初めて実現し, 2010 年度は積算輝度 48.1 pb^{-1} の衝突を達成した. ATLAS 実験グループは効率良いデータ収集で 45.0 pb^{-1} を集めることで, 2010 年度を最初の LHC 物理の年とした. さらに核子あたり 2.76 TeV での鉛-鉛衝突実験も 1ヶ月間行い, $1.7 \mu\text{b}^{-1}$ のデータを用いた重イオン衝突の測定も行った.

2010 年度の最大陽子陽子衝突輝度は, $2 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であり, エネルギー (設計 14 TeV) とともに設計値である $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ に至っていないが, 今度, 徐々に改善され, 2021 年からは, LHC の設計値を超えた sLHC 加速器に増強することを予定している. 放射線レベルも現在の検出器設計の 10 倍に達するため, それに伴う新しい内部飛跡検出器の開発研究も行った.

(1) 標準模型の物理

標準模型粒子の測定として W/Z 粒子の生成断面積, $W+\text{jets}$ 事象の研究, トップ対生成の生成断面積, 光子生成, ジェットの生成, b の物理, J/ψ の生成等に関する研究を進めている.

摂動 QCD (pQCD) 計算は高エネルギーでのハドロン衝突を記述するために不可欠のものであるが, W 生成をプローブとして pQCD を評価するために $W+\text{jets}$ 生成事象を研究している. 図 7 は, W とジェットが随伴生成される事象における, ジェット p_T を横軸にとった $W+\text{jets}$ 微分断面積である. 特に 2 番目に p_T の大きなジェットに注目することで, pQCD 計算の差異への感度を上げているが, 考慮した 4 つの計算とは断面積の絶対値を含め不確かさの範囲で一致した. 今後, より統計を蓄積して詳細な比較を行う.

トップの物理については, $t\bar{t}$ 対生成, 単トップ生成の探索, トップの質量測定などが行われている. 質量測定はいくつかの解析方法で行っているが, もっとも精度の良い結果は $169.3 \pm 4.0 \pm 4.9 \text{ GeV}/c^2$ となり, テバトン平均の $173.3 \pm 0.6 \pm 0.9 \text{ GeV}/c^2$ と一致した値が得られた. 図 8 は, $t\bar{t}$ 生成を 3 レプトン終状態で同定する選択で, レプトン対に崩壊するトップの質量を再構成したものである. また $t\bar{t}$ 対生成断面積を CMS グループの結果および QCD 計算と比較している.

(2) ジェット生成を用いた標準模型を超える物理の探索

QCD ジェットの生成断面積を精度良く測定することで, QCD の検証とともに標準模型を超える物理の探索が可能である.

衝突から発生する p_T の最も高い 2 ジェットの不变質量に対する生成断面積を測定し, 図 9 には 2 つのジェットのラピディティ差 $y^* = (y_1 - y_2)/2$ に対し $|y^*| < 0.6$ の中央領域に生成される事象数を $|y^*| < 1.7$ に生成される事象数で規格化した分布を示す. この分布はジェットが QCD 過程で生成されるとほぼフラットな分布となり, 図に比較したように QCD 計算 (PYTHIA + MRST2007LO* の LO 計算に NLOJET による NLO 補正を施したもの) と一致がよい. 破線で示した分布は, クォークコンタクト項のエネルギースケールが 5 TeV の場合の予想分布で, この結果からクォークは 95%信頼度で 9.5 TeV までは構造が無いと結論した.

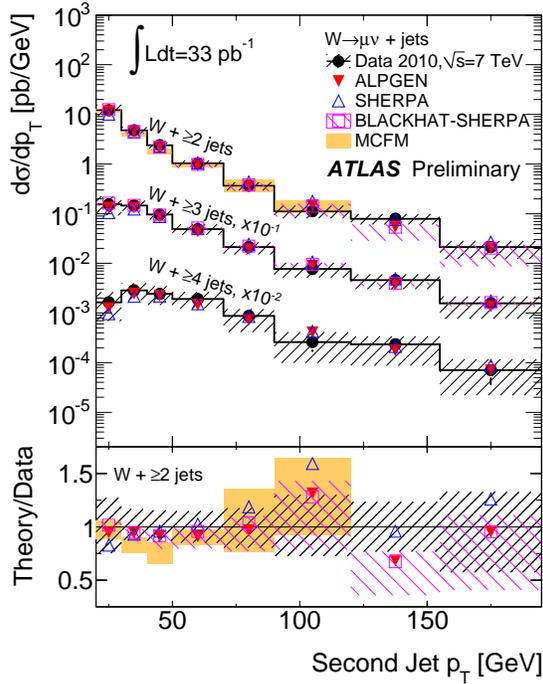


図 7: W +jets 生成に於ける 2 番目に横運動量の高いジェットの p_T 分布. $p_T > 20$ GeV, $|\eta_j| < 2.8$ のジェット数ごとに, いくつかの pQCD 計算と比較している. 分布はバックグラウンドを差引き, 検出器の分解能による分布のゆがみ補正も行っている. 下は各 pQCD 計算とデータとの比で, 不確かさの範囲で全てデータとの顕著な差異はない.

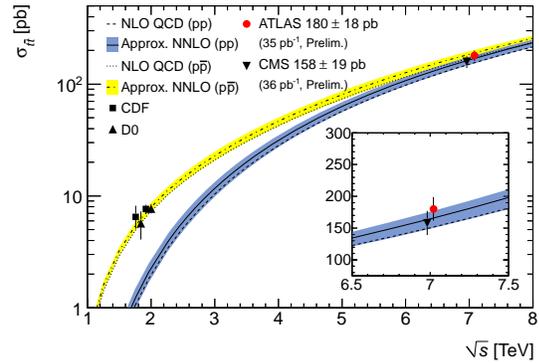
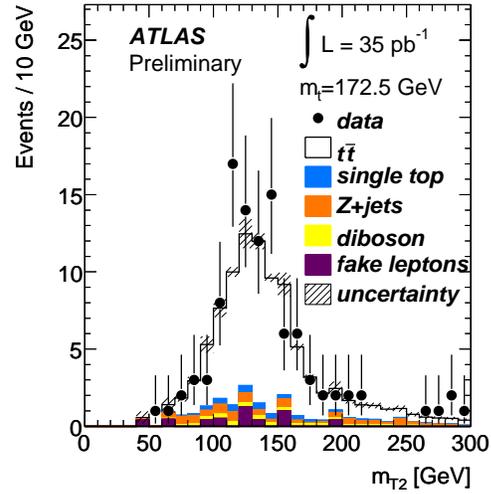


図 8: $t\bar{t}$ 対生成に於ける (上) 質量測定の一例, (下) 断面積の NNLO QCD 計算および他の実験との比較.

クォークに構造があり励起状態が存在すると, $qg \rightarrow g^*$ の過程で生成され $g^* \rightarrow qg, qW, qZ, q\gamma$ の崩壊が期待される. これらの結合が標準模型のクォークと同じと仮定すると 2 ジェットの不变質量分布に励起状態質量に特徴づけられるピークが観測される. そのようなピークを探したところ図 10 に示すように励起状態の質量に対する下限値が得られる. 95%信頼度で 0.60 TeV から 2.64 TeV は排除された. 同様に axigluon に対しても 2.10 TeV までを排除した.

(3) Higgs および SUSY 粒子の探索

Higgs 粒子の探索は LHC 実験の最大の目標であり, 超対称性 SUSY は階層性の問題を解決する最も有力な理論である.

SUSY-Higgs 探索を含め, いくつかの崩壊モードで Higgs 粒子の探索が行われている. 最も標準模型 Higgs に感度の良いのは $Higgs \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$ に崩壊するモードであり, その探索結果を図 11 に示す. 縦軸は標準模型での生成断面積で規格化した Higgs 生成の 95%信頼度での下限値を示す. 下限値の評価方法として 2 種類の方法を採用比較しているが, 破線が Higgs が無いと仮定した場合のバックグラウンドのばらつきから予想されるライン, 実線は

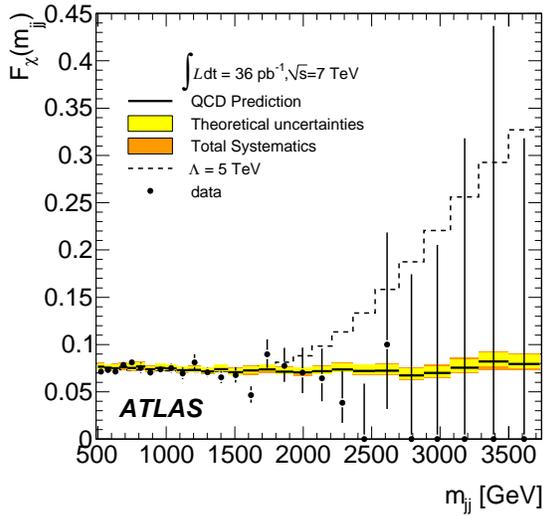


図 9: 2 ジェットが中央領域に生成される割合の 2 ジェット不変質量に対する分布 .

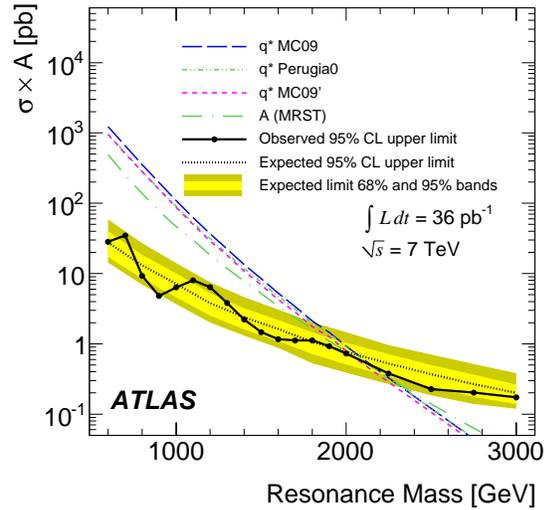


図 10: 励起状態クォーク生成の 95%信頼度での質量下限値 .

実際のデータからの値で、両者がほぼ一致していることはモンテカルロ等の評価法が信頼できることを意味する。それを中心とする帯域は評価の不確かさを意味する。テバトロンでの測定結果とも比較し、また、テバトロンよりは劣るが極めて初期の段階で比較できる測定に達したことは特筆すべきである。

SUSY の探索はいくつかの生成崩壊モードで行われているが、図 12 には、陽子陽子衝突から SUSY 粒子である squark, gluino が生成され、それらが最も軽い SUSY 粒子 (LSP) に崩壊する過程から期待される信号を捕えることで行った SUSY 探索の結果を示す。特に SUSY モデルとしては MSUGRA を仮定した場合、squark 質量 = gluino 質量の条件では $815 \text{ GeV}/c^2$ 以下を排除した。これは図に示すように今までの LEP やテバトロンでの測定よりも遥かに感度の良い測定である。

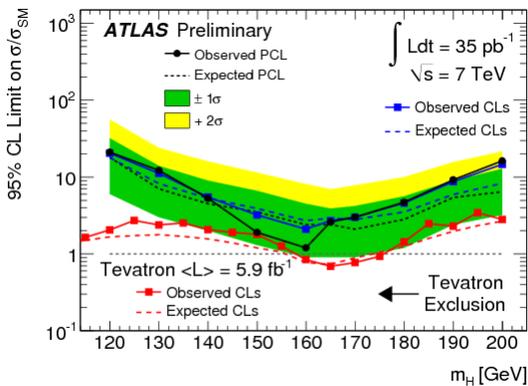


図 11: 排除される Higgs 生成断面積 (標準モデルの断面積で規格化)

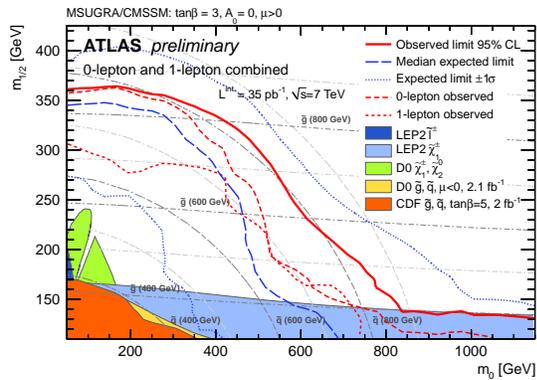


図 12: MSUGRA での SUSY スカラーとフェルミオン質量空間での質量下限値。太い実線が 95%CL での測定下限値。

(4) Pb-Pb 衝突でのジェットクエンチの観測

核子あたり 2.76 TeV の Pb-Pb 衝突で、2 ジェット生成事象でのジェットの p_T バランスの測定を行った。 p_T の非対称性を $A_J = (p_T(1) - p_T(2)) / (p_T(1) + p_T(2))$ で定義し、 $p_T(1) > 100$, $p_T(2) > 25$ GeV を要求する。 前方カロリメータ ($3.2 < |\eta| < 4.9$) でのエネルギー和から核子衝突の中心度を定義し、中心度で 4 つの区間に分けて A_J の分布を求めたものが図 13 である。 衝突中心度が高いと、非対称度が増え、図に示した 2 ジェット間の角度分布も、より角度が狭いイベントが増加する。 同じ解析を陽子陽子衝突で行うとこのような依存性はなく、重イオン衝突に特有な現象と結論できる。 この現象は、例えば、生成されたクォークやグルーオンがハドロン化する前にプラズマ状態の周囲と多重散乱することでエネルギーを失い、その散乱が事象毎に違うために p_T バランスが失われるとするジェットクエンチ現象で説明できる。

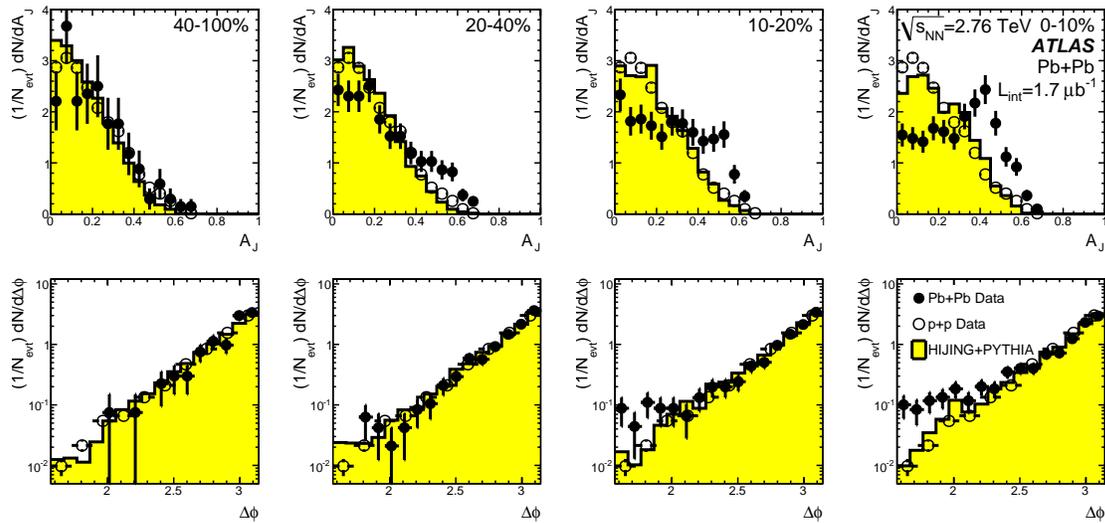


図 13: (上)2 ジェットの p_T 非対称度分布, (下)2 ジェット間の角度分布を衝突中心度で区別 (右ほど中心度が高い) して, Pb-Pb 衝突と p-p 衝突で比較。

(5) sLHC に用いる p 型シリコン検出器の開発

sLHC での内部飛跡検出器には、 10^{15} 1-MeV n_{eq} cm^{-2} 相当の放射線量が予想されている。 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、sLHC 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。 昨年度までの研究で、FZ 法による高抵抗の p 型シリコン基板を用いて、P-STOP による電極分離の構造を変えたセンサーを試作した。 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結果、sLHC の高放射線線量を受けても使用可能な設計が

確立した．全空乏化電圧の上昇も急激ではなく，収集電荷量も 50%を下回ることはない．これらの成果を受けて，本センサーは ATLAS の正式の基本設計として認められるに至った．

2010 年度は，主に ^{60}Co γ を sLHC の運転時に近い線量率で照射し，センサーの振る舞いを詳細に調べた．また，加速器事故で一度に大量の粒子が入射された場合に発生する大電流からのセンサー保護機能の評価を継続して行った．

図 14 は 100 Gy/h の照射率で ^{60}Co γ 線をセンサーに当てながらブレークダウン電圧を測定したものである．sLHC では，最大 50 Gy/h 程度なのでその条件に近い．2 種類の高純度 FZ 基板について測定した結果，未照射時に 1000 V ないし 600 V であった値が照射直後に 500 V ないし 100 V に低下し，その後次第に未照射での値に回復していく．センサーの全空乏化電圧は約 200 V なので，それを下回る FZ2 は使用できない．この変化はセンサーの周辺構造の設計によるものと考えられ，今後，より詳細な評価と改良を加えることで，安定して動作するセンサー設計をめざす．

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．実際に赤外線レーザーをセンサーに入射し，パンチスルーがどのように実現されるかを測定した．電極の抵抗のために起る電圧降下は，レーザーの入射位置，信号読み出し位置の影響を受けるので，図 15 は，8 mm 長の電極に対して，入射位置，読み出し位置の 4 つの組み合わせで，電極電位がどこまで上がるかを直接測定した．このような電圧が加わる時間情報も得ているので，パンチスルー構造の改良とともにセンサー設計の仕様となる耐久試験を計画している．

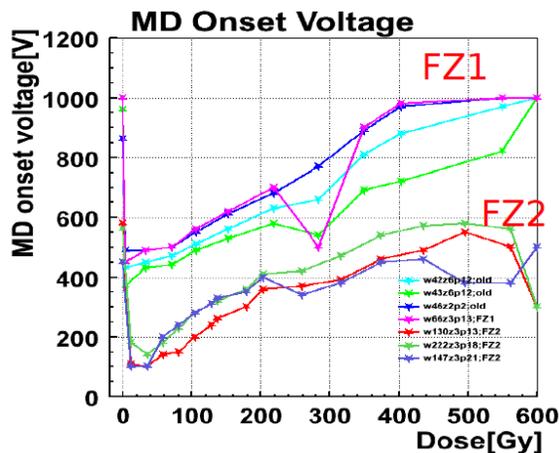


図 14: コバルト照射中のマイクロ放電電圧の変化を 2 種類の FZ ウェハーで試験．照射率は 100 Gy/h.

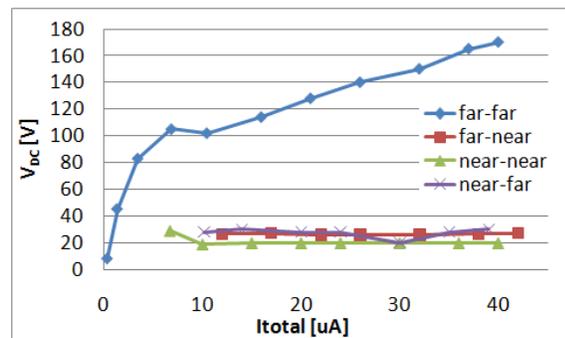


図 15: 赤外パルスレーザーを入射した時に，読み出し電極に発生する最大電圧．レーザーの入射場所や電圧を測定する場所の 4 つの組み合わせでのデータ．横軸の電流値 $40\mu\text{A}$ で約 10^6 個の荷電粒子が一度に通過した場合に相当する．

(6) 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 KEK の先端検出器開発室と共同で開発研究を行っている。

素粒子実験での衝突点近傍に設置されるピクセル検出器には、荷電粒子を捕えられる十分な深さの空乏層が実現され、しかし多重散乱を抑えるために物質量を減らす要請もある。一体型でノイズを低く抑えられる SOI デバイスにとって、同時に十分に高い S/N とセンサー薄型化が実現できれば、極めて有効な特長となる。

通常センサーは $260\mu\text{m}$ の厚みであるが、さらに $100\mu\text{m}$ まで薄くする試作を行った。図 16 は赤外レーザーを表面から赤色レーザーを裏面から入射した場合の信号量をバイアス電圧を変えて測定した。赤外に対しては、空乏層の広がりに応じて、また赤色には空乏層が裏面に達する電圧で急激に信号量が増え、その後一定になる特徴的な応答が得られ、薄型化により SOI センサーで初めて全空乏化デバイスが実現された。同センサーは東北大学 670MeV の陽電子ビームで試験を行った。通常厚のセンサーとの信号量分布の比較を図 17 に示す。期待通り、同じバイアス電圧では等量の収集電荷量が観測された。S/N は約 20 を達成し、飛跡検出器として十分な性能を示した。

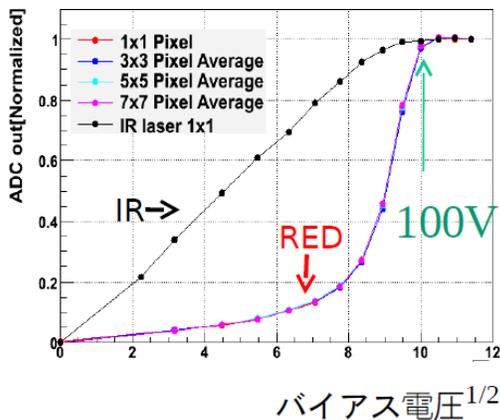


図 16: 薄型化した INTPIX の赤外および赤色レーザーに対する応答。

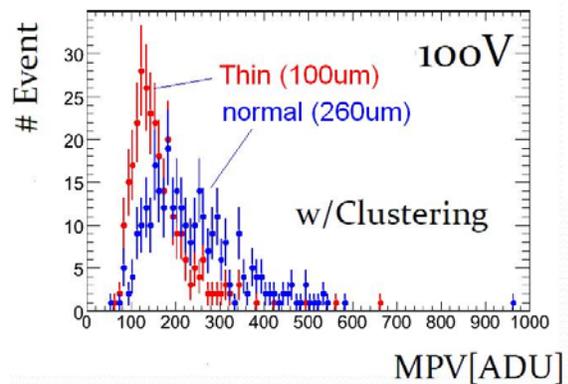


図 17: 陽電子ビームにより測定された波高分布。バイアス = 100V 。

【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。

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

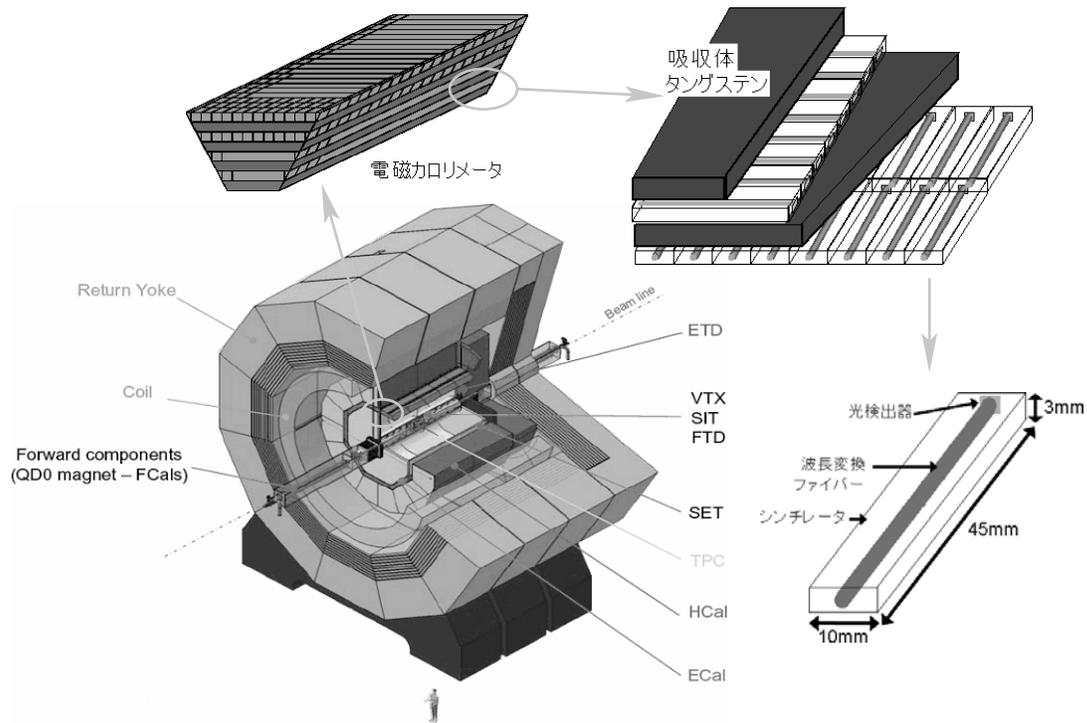


図 18: ILC(ILD) 検出器の構造，および電磁カロリメータのモジュールを一部取り出したもの．カロリメータは，吸収体とシンチレータ層をもつサンプリングカロリメータとなっており，シンチレータ層は，ストリップシンチレータを横方向と縦方向を交差させ並べた構造になっている．またストリップシンチレータは波長変換ファイバーが埋め込まれ，光検出器によって読み出される．

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 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，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前提として 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，そして温度加速試験による基礎特性の長期安定性の測定を行ってきた．

昨年度(2010年度)においては，MPPC単体の試験から更により実機に近づけた形として，シンチレータのストリップ及び波長変換ファイバーとMPPCを組み合わせたモジュールでの応答特性の試験を主に行った．また，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，2008年および2009年に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ているが，このビームテストの結果をMPPCの応答特性とシンチレータストリップ内の応答一様性を考量した上でのシミュレーションとの比較を行った．MPPCは，非常に短い光パルスに対

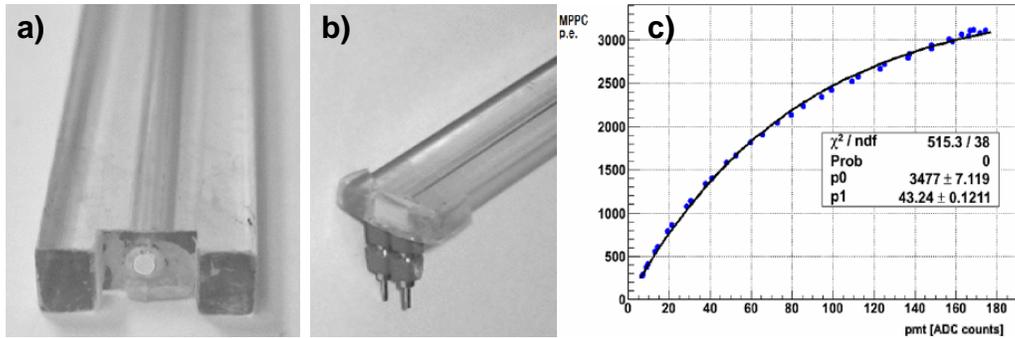


図 19: a)ILC 電磁カロリメータ細分割ストリップシンチレータ．波長変換ファイバーが埋め込まれている．b) ストリップに MPPC を取り付けた状態．c) レーザ光入射に対する MPPC 読み出しストリップの応答．横軸は，光量モニターのために波長変換ファイバーのもう一端に接続している光電子増倍管の出力電荷．

しては，ピクセル数以上の出力を出せないため，ピクセル数に近い光電子数入力に対しては飽和が起こる．しかし，MPPC のピクセルは，4ns という非常に短い回復時間を持っていることがわかっており，入力される光パルスの時間幅がこの回復時間よりも長いときは同じピクセルが何度も出力を出すことによって，MPPC は，ピクセル数以上の出力を出すことができると考えられる．したがって，MPPC の出力飽和が始まるのがどのくらいの光電子数で，完全に出力が飽和するのがどこなのかは，光パルスの時間形状に依存する．図 19 は，より実機に近い光パルス入力 MPPC に入射した場合の MPPC の応答を見るために用いた細分割ストリップシンチレータ，およびシンチレータ部分にレーザーを入射させることにより得た MPPC の応答曲線を示している．1600 ピクセルの MPPC に対して，飽和点が約 3400 ピクセル数相当であることがわかる．図 20 は，ストリップ型細分割電磁カロリメータの実証試験のために行われたビームテストのデータと比較するためのシミュレーションの様子を示す．細分割ストリップは，一端から MPPC で光を読み出す構造のため，ストリップ内のどの位置に荷電粒子が通過したかによって出力の大きさが異なることが図に示されている．このシミュレーションにおいては，先に述べられた MPPC 応答曲線，およびこのストリップ内の減衰曲線が考慮されている．このシミュレーションの結果から，ストリップ内の位置による応答非一様性は，電磁カロリメータのエネルギーの分解能には，ほとんど寄与しないということわかった．

今後，これらの研究を更に発展させ，より実機に近い条件での MPPC の特性を調べ，新たな試作機による実証試験等も計画している．

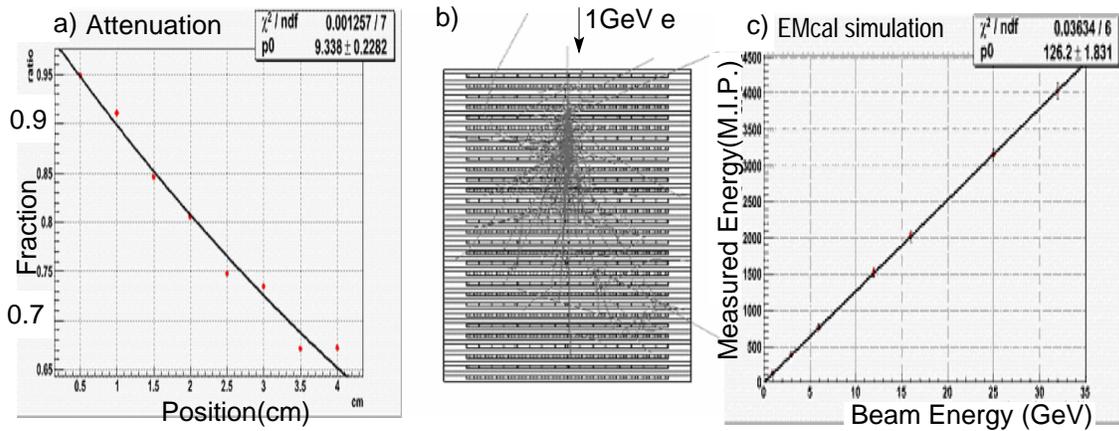


図 20: a) ストリップ読み出しの減衰曲線．MPPC 端からの距離に対する規格化された出力の大きさを示す．b) ストリップ型細分割電磁カロリメータに 1GeV 電子を入射したシミュレーションの様子．c) シミュレーションに MPPC 応答曲線とストリップ内の減衰曲線を考慮したシミュレーションによる電磁カロリメータ応答．入射粒子のエネルギーに対する読み出しエネルギーを MIP 相当で示す．

【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 (ν_3) から軽いニュートリノ (ν_2) と光子に寿命約 10^{43} 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上限として低エネルギー側のみ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、これまで、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 HfO_x の膜を使用した Nb-Hf STJ を作成し、絶縁膜の作成条件の探索を行ってきた。Nb を使用することのメリットは、Nb の近接効果により、転移温度を高くすることができるということであるが、しかし、Nb の上に Hf を成膜する際に均一に成長せず、酸化膜による絶縁がうまくいかないことがわかった。

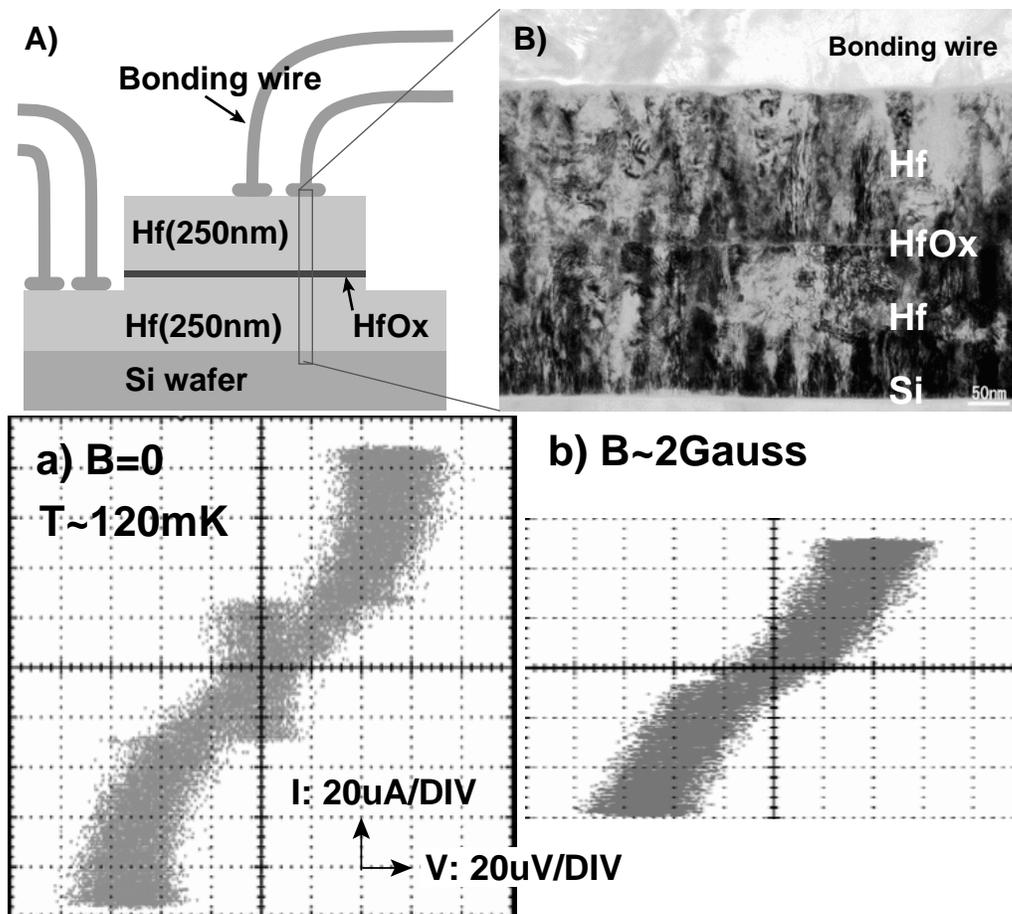


図 21: A) 評価用に作成した Hf の SIS 構造を持つ電極。ボンディングワイヤーを直接上下部電極に取り付けている。B) ボンディングワイヤー直下の Hf SIS 構造の TEM 画像。a) 試作 Hf-STJ の I-V 曲線（磁場無し）。b) 磁場をかけた状態。磁場無しでは見えていた $V=0$ におけるジョセフソン電が消失している。

そこで、昨年度(2010年度)においては、Nbを使用することをやめて、Hfで直接超伝導体-絶縁膜-超伝導体(SIS)の構造を作りI-V特性を見ることで確認するという方針をとった。図21A)に、試作したHf-STJの構造を模式図で示した。上下部電極の読み出しには、素子製造過程での不確定要素をできるだけ排除するようにワイヤーを直接電極にボンディングするというシンプルな方式を採用した。また、TEM解析により、SISの構造ができていることも確認された(図21B)。

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、現在のところ最低温49 mKを達成している。現在、この冷凍機の中にファイバーを導入し可視光に対するSTJ素子の応答が見れるように準備中である。

Hf-STJ試料を多数作成し、低温でI-V曲線を測定したところ、そのうちいくつかの試料にSIS構造ができていることを示すジョセフソン電流が確認できた(図21 a,b)。しかしながら、まだ確実にSIS構造を持つ試料を作成するには至っておらず、またリーク電流が大きいため検出器として動作させるには、更に改善の必要がある。

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。更に数年のうちに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の開発を目指す。

【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:9,600千円
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 24,100千円
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) 390千円
4. 科学研究費補助金「ハドロン衝突におけるクォークオニウム生成機構の解明」
受川 史彦:基盤研究(C) 1,950千円
5. 科学研究費補助金「二体ミュオン粒子及び二体荷電粒子トリガーを用いたbクォーク電弱希崩壊の精密測定」
三宅 秀樹:若手研究(B) 2,340千円

【6】 研究発表

(1) 学会誌等への発表論文

1. “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).
2. “Measurements of the Top-Quark Mass using Charged Particle Tracking,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D**81**, 032002 (2010).
3. “Inclusive Search for Standard Model Higgs Boson Production in the WW Decay Channel using the CDF II Detector,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **104**, 061803 (2010).
4. “Combination of Tevatron Searches for the Standard Model Higgs Boson in the W^+W^- Decay Mode,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **104**, 061802 (2010).
5. “Measurement of the Top Quark Mass in the Dilepton Channel using m_{T2} at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D**81**, 031102 (2010).
6. “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), Phys. Rev. D**81**, 031105 (2010).
7. “Search for New Bottomlike Quark Pair Decays $Q^+Q^- \rightarrow (tW^\mp)(\bar{t}W^\pm)$ in Same-Charge Dilepton Events,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **104**, 091801 (2010).
8. “Measurement of the $WW + WZ$ Production Cross Section Using the Lepton + Jets Final State at CDF II,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **104**, 101801 (2010).
9. “Measurement of the Λ_b^0 Lifetime in $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+ \pi^-$ Decays in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **104**, 102002 (2010).
10. “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), Phys. Rev. D**81**, 052006 (2010).
11. “Search for Technicolor Particles Produced in Association with a W Boson at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **104**, 111802 (2010).
12. “Measurement of the Top Quark Mass and $p\bar{p} \rightarrow t\bar{t}$ Cross Section in the All-Hadronic Mode with the CDF II Detector,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D**81**, 052011 (2010).

13. “First 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), Phys. Rev. Lett. **104**, 131801 (2010).
14. “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), Phys. Rev. Lett. **104**, 141801 (2010).
15. “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), Phys. Rev. D**81**, 072003 (2010).
16. “Measurement of the $t\bar{t}$ Production Cross Section in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV using Soft Electron b -Tagging,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D**81**, 092002 (2010).
17. “Search for WW and WZ Resonances Decaying to Electron, Missing E_T , and Two Jets in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **104**, 241801 (2010).
18. “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), Phys. Rev. Lett. **104**, 201801 (2010).
19. “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), Phys. Rev. Lett. **104**, 251801 (2010).
20. “Measurement of the Ratio $\sigma_{t\bar{t}}/\sigma_{Z/\gamma^* \rightarrow \ell\ell}$ and Precise Extraction of the $t\bar{t}$ Cross Section,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **105**, 012001 (2010).
21. “Combined Tevatron Upper Limit on $gg \rightarrow H^- \rightarrow W^+W^-$ and Constraints on the Higgs Boson Mass in Fourth-Generation Fermion Models,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D**82**, 011102 (2010).
22. “Study of Multi-Muon Events Produced in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Eur. Phys. J. C**68**, 109 (2010).
23. “Search for New Color-Octet Vector Particle Decaying to $t\bar{t}$ in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Lett. B**691**, 183 (2010).
24. “Measurement of W -Boson Polarization in Top-quark Decay in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **105**, 042002 (2010).
25. “Studying the Underlying Event in Drell-Yan and High Transverse Momentum Jet Production at the Tevatron,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D**82**, 034001 (2010).

26. “Search for the Production of Scalar Bottom Quarks in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **105**, 081802 (2010).
27. “Measurement of $Z\gamma$ Production in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D**82**, 031103 (2010).
28. “Exclusion of an Exotic Top Quark with $-4/3$ Electric Charge Using Soft Lepton Tagging,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **105**, 101801 (2010).
29. “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), Phys. Rev. Lett. **105**, 131801 (2010).
30. “Measurement of the Top Pair Production Cross Section in the Dilepton Decay Channel in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D**82**, 052002 (2010).
31. “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), Phys. Lett. B**692**, 232 (2010).
32. “Search for Anomalous Production of Events with Two Photons and Additional Energetic Objects at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D**82**, 052005 (2010).
33. “Search for the Supersymmetric Partner of the Top Quark in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D**82**, 092001 (2010).
34. “Search for R-parity Violating Decays of Sneutrinos to $e\mu$, $\mu\tau$, and $e\tau$ Pairs in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **105**, 191801 (2010).
35. “Updated Search for the Flavor-Changing Neutral-Current Decay $D^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D**82**, 091105 (2010).
36. “Measurement of the $WW + WZ$ Production Cross Section Using a Matrix Element Technique in Lepton + Jets Events,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D**82**, 112001 (2010).
37. “Direct Top-Quark Width Measurement at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **105**, 232003 (2010).
38. “Diffractive W and Z Production at the Fermilab Tevatron,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D**82**, 112004 (2010).

39. “Improved Search for 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. **105**, 251802 (2010).
40. “Top Quark Mass Measurement in the Lepton + Jets Channel Using a Matrix Element Method and *in situ* Jet Energy Calibration,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **105**, 252001 (2010).
41. “Observation of Single Top Quark Production and Measurement of $|V_{tb}|$ with CDF,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D**82**, 112005 (2010).
42. “Search for Randall-Sundrum Gravitons in the Diphoton Channel at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D**83**, 011102 (2011).
43. “Search for a New Heavy Gauge Boson W' with Event Signature Electron + Missing Transverse Energy in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D**83**, 031102(R) (2011).
44. “Measurement of the B^- Lifetime Using a Simulation Free Approach for Trigger Bias Correction,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1004.4855 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. D)
45. “Measurement of the $t\bar{t}$ Production Cross Section with an *in situ* Calibration of b -jet Identification Efficiency,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1007.4423 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Lett. B)
46. “Search for the Supersymmetric Partner of the Top Quark in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1009.0266 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. D)
47. “Measurement of b Hadron Lifetimes in Exclusive Decays Containing a J/ψ in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1012.3138 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
48. “Measurement of $t\bar{t}$ Spin Correlation in $p\bar{p}$ Collisions Using the CDF II Detector at the Tevatron,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1012.3093 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
49. “Evidence for a Mass Dependent Forward-Backward Asymmetry in Top Quark Pair Production,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1101.0034 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. D)

50. “Measurement of the Forward-Backward Asymmetry in the $B \rightarrow K^{(*)}\mu^+\mu^-$ Decay and First Observation of the $B_s^0 \rightarrow \phi\mu^+\mu^-$ Decay,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1101.1028 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
51. “Search for High Mass Resonances Decaying to Muon Pairs in $\sqrt{s} = 1.96$ TeV $p\bar{p}$ Collisions,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1101.4578 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
52. “Production of Λ^0 , $\bar{\Lambda}^0$, Ξ^\pm , and Ω^\pm Hyperons in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1101.2996 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. D)
53. “Measurement of the Top Quark Mass in the Lepton + Jets Channel Using the Lepton Transverse Momentum,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1101.4926 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Lett. B)
54. “Search for Heavy Bottom-Like Quarks Decaying to an Electron or Muon and Jets in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1101.5728 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
55. “Observation of the $Y(4140)$ Structure in the $J/\psi\phi$ Mass Spectrum in $B^\pm \rightarrow J/\psi\phi K^\pm$ Decays,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1101.6058 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
56. “Search for the Higgs boson in the All-Hadronic Final State using the CDF II Detector,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1102.0024 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
57. “Observation of $B_s^0 \rightarrow J/\psi K^*(892)^0$ and $B_s^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$ Decays,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1102.1961 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. D)
58. “Search for Quark Contact Interactions in Dijet Angular Distributions in 7 TeV Proton-Proton Collisions 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 694** 327-345 (2010).
59. ”Search for New Particles in Two-Jet Final States in 7 TeV Proton-Proton Collisions 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. Rev. Lett. **105** 161801 (2010).

60. "Observation of a centrality-dependent dijet asymmetry in lead-lead collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV 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. Rev. Lett. **105** 252303 (2010).
61. "Measurement of the $W \rightarrow \ell\nu$ and $Z/\gamma^* \rightarrow \ell\ell$ production cross sections in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector",
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, M. Kurata, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, JHEP **12** 060 (2010).
62. "Measurement of inclusive jet and dijet cross sections in proton-proton collisions at 7 TeV centre-of-mass energy with the ATLAS detector",
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, M. Kurata, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, EPJC **71** 1 (2011).
63. "Search for Diphoton Events with Large Missing Transverse Energy in 7 TeV Proton-Proton Collisions with the ATLAS Detector",
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, M. Kurata, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **106** 121803 (2010).
64. "Measurement of the inclusive isolated prompt photon cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector",
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, M. Kurata, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Rev. **D83** 052005 (2011).
65. "Study of Jet Shapes in Inclusive Jet Production in pp Collisions at $\sqrt{s}= 7$ TeV using the ATLAS Detector", ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, M. Kurata, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **D83** 052003 (2011).
66. "Search for supersymmetry using final states with one lepton, jets, and missing transverse momentum with the ATLAS detector in $\sqrt{s}=7$ TeV pp collisions",
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, M. Kurata, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **106** 131802 (2011).
67. "Measurement of the production cross section for W-bosons in association with jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector",
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, M. Kurata, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Lett. **B694** 325-345 (2011).
68. "Measurement of the centrality dependence of J/ψ yields and observation of Z production in lead-lead collisions 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. **B697** 294-312 (2011).
69. "Study of Jet Shapes in Inclusive Jet Production in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS Detector",
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, M. Kurata, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Rev. **D83** 052003 (2011).

70. "Search for Massive Long-lived Highly Ionising Particles 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. **B698** 353-370 (2011).
71. "Search for supersymmetry using final states with one lepton, jets, and missing transverse momentum with the ATLAS detector in $\sqrt{s}=7$ TeV pp collisions",
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, M. Kurata, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **106** 131802 (2011).
72. "Drift Time Measurement in the ATLAS Liquid Argon Electromagnetic Calorimeter using Cosmic Muons",
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, M. Kurata, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, EPJC **70** 755 (2010).
73. "Readiness of the ATLAS Liquid Argon Calorimeter for LHC Collisions",
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, M. Kurata, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, EPJC **70** 723 (2010).
74. "The ATLAS Inner Detector commissioning and calibration",
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, M. Kurata, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, EPJC **70** 787 (2010).
75. "The ATLAS Simulation Infrastructure",
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, M. Kurata, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, EPJC **70** 823 (2010).
76. "Commissioning of the ATLAS Muon Spectrometer with Cosmic Rays",
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, M. Kurata, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, EPJC **70** 875 (2010).
77. "Readiness of the ATLAS tile calorimeter for LHC collisions",
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, M. Kurata, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, EPJC **70** 1193 (2010).
78. "Measurement of the centrality dependence of J/ψ yields and observation of Z production in lead-lead collisions 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. **B697** 294-312 (2011).
79. " Combined performance studies for electrons at the 2004 ATLAS combined test-beam ",
E. Abat, K. Hara *et al.*, JINST **5** P11006 (2010).
80. "Testing of bulk damage of n-in-p silicon sensors for very high radiation environments",
K. Hara *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A(2010),doi:10.1016/j.nima.2010.04.090.

81. "Testing of surface properties pre-rad and post-rad of n-in-p silicon sensors for very high radiation environment",
S. Lindgren, K. Hara *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A(2010),doi:10.1016/j.nima.2010.04.094.
82. "Development of n-on-p silicon sensors for very high radiation environment",
Y. Unno, K. Hara *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A(2010),doi:10.1016/j.nima.2010.04.080.
83. "Radiation effects in silicon-on-insulator transistors with back-gate control method fabricated with OKI Semiconductor 0.20 μm FD-SOI technology",
M. Kochiyama, K. Hara *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A(2010),doi:10.1016/j.nima.2010.04.086.
84. "Development of SOI pixel process technology",
Y. Arai, K. Hara *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A(2010),doi:10.1016/j.nima.2010.04.081.
85. "Development of SOI monolithic pixel detectors",
Y. Arai, K. Hara *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A(2010),doi:10.1016/j.nima.2010.02.190.
86. "Development of low-mass, high-density, hybrid circuit for the silicon microstrip sensors in high track density environment",
Y. Ikegami, K. Hara *et al.*, PoS RD09, 021 (2010).

(2) 学会・研究会での講演（国内）

1. 戸村 友宣: "Recent B Physics Results from CDF,"
CPV from B Factories to Tevatron and LHCb (2010年9月1日-2日), 東北大学.
2. 佐藤 構二: "Tevatron におけるヒッグス粒子探索と新物理探索,"
基研研究会 素粒子物理学の進展 2011 (2011年3月7日-10日), 京都大学 基礎物理学研究所.
3. 三宅 秀樹: "Tevatron における B 物理の最新結果,"
基研研究会 素粒子物理学の進展 2011 (2011年3月7日-10日), 京都大学 基礎物理学研究所.
4. 林隆康: LHC-ATLAS 実験における $W + \text{jets}$ 事象の研究
日本物理学会 2010 年秋季大会 (2010年9月11日-14日), 九州工業大学.
5. 埴慶太: ATLAS 初期に於けるタウ粒子同定の研究
日本物理学会 2010 年秋季大会 (2010年9月11日-14日), 九州工業大学.
6. 黒川悠文: γ コンバージョンを用いた ATLAS 内部飛跡検出器の物質評価 (2)
日本物理学会 2010 年秋季大会 (2010年9月11日-14日), 九州工業大学.
7. 新庄康平: SOI 技術を用いた読み出し一体型ピクセル検出器の開発 (検出部ウェハの薄型化)
日本物理学会 2010 年秋季大会 (2010年9月11日-14日), 九州工業大学.
8. 林隆康: LHC - ATLAS 実験における $W + \text{jets}$ 事象の生成断面積測定
日本物理学会第 66 回年次大会 (2011年3月25日-28日), 新潟大学.

9. 塙慶太：ATLAS 実験における W 事象を用いたタウ粒子同定効率とエネルギー測定精度の評価と改良
日本物理学会第 66 回年次大会（2011 年 3 月 25 日–28 日），新潟大学.
10. 新庄康平：センサー部薄型化 SOI ピクセル検出器の陽電子ビーム照射試験
日本物理学会第 66 回年次大会（2011 年 3 月 25 日–28 日），新潟大学.
11. 高橋優：SLHC 実験に用いる高放射線耐性 P 型シリコンマイクロストリップセンサーのガンマ線照射試験
日本物理学会第 66 回年次大会（2011 年 3 月 25 日–28 日），新潟大学.
12. 小池博子：ILC カロリメータに用いる光検出器 MPPC の応答線形性の研究，
日本物理学会 2010 年秋季大会（2010 年 9 月 11 日–14 日），九州工業大学
13. 木内健司：Hf-STJ 開発状況報告，
KEK 測定器開発室月例会議 SDC 重点レビュー（2011 年 2 月 15 日），高エネルギー加速器研究機構
14. 木内健司：ハフニウムを用いた超伝導トンネル接合素子 (Hf-STJ) 検出器の研究開発，
日本物理学会第 66 回年次大会（2011 年 3 月 25 日–28 日），新潟大学
15. 小池博子：ILC カロリメータに用いる光検出器 MPPC の応答線形性試験，
日本物理学会第 66 回年次大会（2011 年 3 月 25 日–28 日），新潟大学
16. 田中航平：ILC 電磁カロリメータの応答一様性の評価，
日本物理学会第 66 回年次大会（2011 年 3 月 25 日–28 日），新潟大学
17. 武内 勇司：“陽子・反陽子衝突実験におけるトップクォーク対生成前後方非対称度の測定，”
日本物理学会 第 66 回年次大会（2011 年 3 月 25 日–28 日），新潟大学.
18. 武政 健一：“陽子・反陽子衝突実験におけるトップクォーク対生成事象でのスピン偏極度相関の測定，”
日本物理学会 第 66 回年次大会（2011 年 3 月 25 日–28 日），新潟大学.

(3) 国際会議・研究会での講演・ポスター発表

1. Hideki Miyake, “Results on *B* Physics at CDF,”
CERN Joint EP/PP Seminars, April 27, 2010, Geneva, Switzerland.
2. Yoshikazu Nagai, “Search for Higgs Boson Production in Association with a *W* Boson at CDF,”
2010 Phenomenology Symposium, May 10–12, 2010, Madison, Wisconsin, USA.
3. Yoshikazu Nagai, “Standard Model Low mass Higgs search at CDF,”
35th International Conference on High Energy Physics (ICHEP), July 22–28, 2010, Paris, France.

4. Fumihiko Ukegawa: “Photo-sensor studies,”
6th Join Korea-Japan ScEcal Meeting, September 3, 2010, Kobe University, Kobe, Japan.
5. Koji Sato, “Tevatron,”
KEK Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology (KEK-PH2011), March 2–5, 2011, High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba, Japan.
6. K. Hara, “Plans of the SOIPIX Collaborationp”,
Invited Talk at VERTEX2010, Loch Lomond, Scotland, UK, June 6-11, 2010.
7. K. Shinsho and K. Hara, “Evaluation of Monolithic Silicon-On-Insulator Pixel Devices Thinned to 100 μm ”,
IEEE Nuclear Science Symposium, Knoxville, Tennessee, Oct. 30-Nov. 6, 2010.
8. K. Hara, “ Design of Punch-Through Protection”,
ATLAS Upgrade Tracker Workshop, Oxford, UK, Mar.27-Apr. 1, 2011.
9. Ken-ichi Takemasa, “A Measurement of $t\bar{t}$ spin correlations coefficient in Dilepton candidates,”
Fermilab Users’ Meeting, June 2–3, 2010, Batavia, Illinois, USA.

(4) 会議・研究会報告書

1. H. Miyake, “Rare decays/ B_s CPV measurements at Tevatron,”
in proceedings of “XXth Hadron Collider Physics Symposium,” PoS(HCP2009)033.
2. Y. Nagai, “Standard Model Low Mass Higgs Search at CDF,”
in proceedings of “35th International Conference on High Energy Physics,” PoS(ICHEP 2010)067.
3. K. Hara (for the ATLAS Collaboration), “ATLAS commissioning and early physics of resonance and jet production”,
Chinese Physics C34-9 (2010) 1530.
4. K. Hara,*et al.*, “Development of INTPIX and CNTPIX Silicon-On-Insulator Monolithic Pixel Devices”,
Proceeding of Science (VERTEX2010) 033, Loch Lomond, UK, June 6-11, 2010.
5. K. Shinsho, K. Hara,*et al.*, “Evaluation of Monolithic Silicon-On-Insulator Pixel Devices Thinned to 100 μm ”,
IEEE Nuclear Science Symposium CR N23-2, Knoxville, Tennessee, Oct. 30-Nov. 6, 2010.

(5) 学位論文

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，2011年2月．

1. 木内 健司：高エネルギー分解能を有するハフニウム系超伝導トンネル接合光子検出器の開発研究
2. 黒川悠文：光コンバージョンによる ATLAS 内部飛跡検出器の物質量の研究
3. 小池博子：リニアコライダー実験用細分割カロリメータに用いる光検出器 MPPC の応答線形性の研究
4. 田中航平：リニアコライダー実験用細分割電磁カロリメータの応答一様性の評価
5. 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
6. 濱崎菜都美：パンチスルーを用いたシリコンセンサー保護機能の評価

【構成員の異動】

1. 2010年4月に永井義一が研究員として着任．
2. 2011年3月に戸村友宣研究員が東京大学宇宙線研究所助教に転出．