

II. 素粒子実験グループ

教授	金 信弘, 受川 史彦
准教授	原 和彦
講師	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
大学院生	18 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2011年度に運転終了, 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 STJ 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 実験が継続されてきたが, 2011年9月30日に加速器・検出器ともにその運転が終了した。

1996年に前回の物理実験 Run I が終了した後, テバトロン加速器および CDF 検出器は大幅な増強が行われ, 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最高値 $\mathcal{L} = 4.3 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を達成し設計値 $10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を大きく上回った。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 12 fb^{-1} に達した。CDF 検出器により記録されたデータ量は約 10 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) 電弱相互作用の物理

電弱相互作用は電磁相互作用と弱い相互作用を統一的に記述する。弱い相互作用を媒介する W ボソンはおよそ $80 \text{ GeV}/c^2$ の質量を持つが, Run-II 実験で得られた 2.2 fb^{-1} 相当のデータを用いてその精密測定がなされた。図 1 に電子およびミュー粒子への崩壊様式を用い

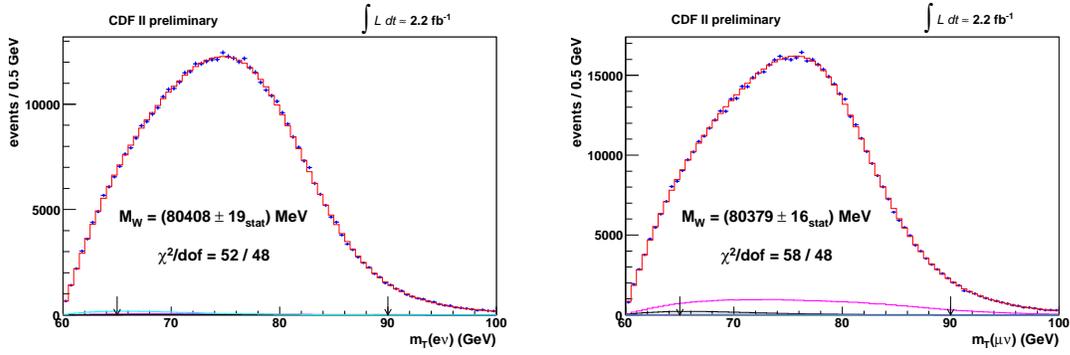


図 1: W ボソンの横質量分布, 電子 (左) およびミュー粒子 (右) への崩壊様式.

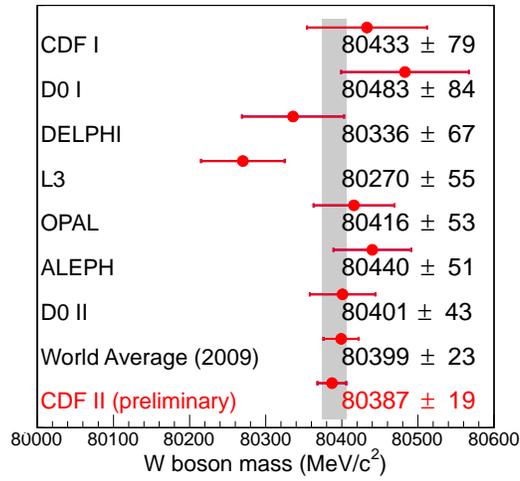


図 2: W ボソンの質量測定の一覧.

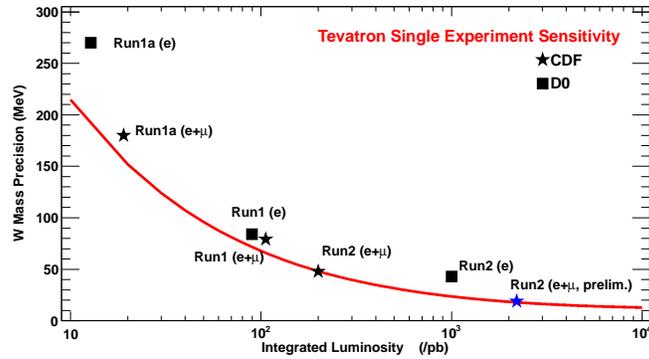


図 3: W ボソンの質量測定の精度の変遷.

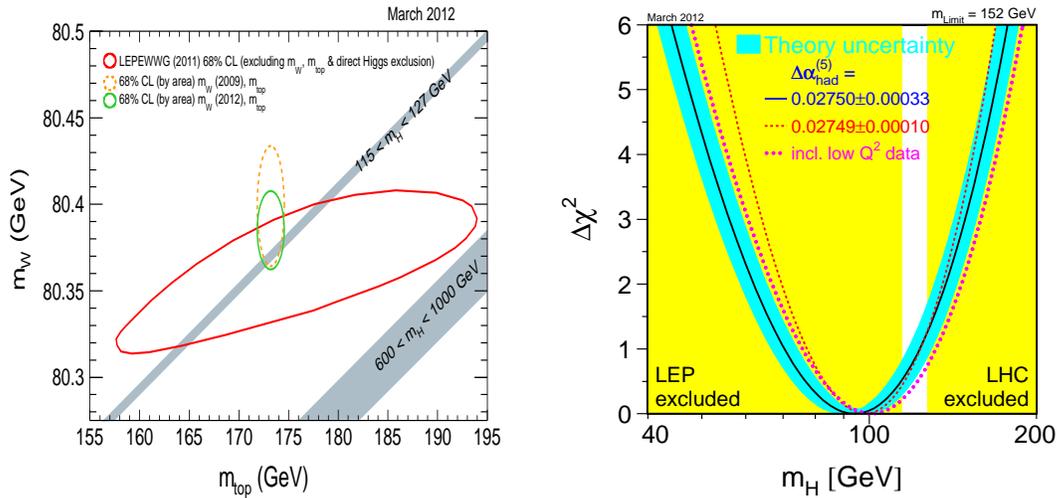


図 4: 左: W ボソンとトップクォークの質量の測定. 右: ヒッグス粒子の質量に対する制限.

て再構成された W ボソンの横質量分布を示す. 候補事象数はそれぞれ 470 k, 624 k である. 質量は $m_W = 80.387 \pm 0.019 \text{ GeV}/c^2$ と決定された. 図 2 に, 測定の一覧を示す. 今回の測定は, 単独の測定でこれまでの世界平均の精度 ($\pm 23 \text{ MeV}/c^2$) を上回るものである. また, W ボソン質量測定の変遷を図 3 に示す. W ボソンとトップ・クォークの質量の精密測定は, ヒッグス粒子の質量についての制限を与える. これについては後述する.

(2) トップクォークの物理

CDF 実験による 1995 年のトップクォーク発見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ある.

その質量は多くの終状態を用いて測定されている. トップクォーク対が 1 つの荷電レプトンと 4 つのジェットを含む終状態に崩壊するチャンネル (レプトン+ジェットチャンネル) は, 崩壊分岐比および信号・雑音比がともに高く, 精度の良い測定が可能である. 8.7 fb^{-1} 相当のデータを用いて, $m_{top} = 172.8 \pm 0.5$ (統計) ± 0.5 (ジェットエネルギー) ± 0.8 (系統) GeV/c^2 という結果を得た. CDF 実験の平均値は $m_{top} = 172.7 \pm 0.6$ (統計) ± 0.9 (系統) GeV/c^2 であり, 他実験も含むすべての測定の平均値は $173.2 \pm 0.6 \pm 0.8 \text{ GeV}/c^2$ 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 4 にこれを示す. 標準理論ヒッグス粒子の質量について $m_{Higgs} = 94^{+29}_{-24} \text{ GeV}/c^2$ (68% CL) および $m_{Higgs} < 152 \text{ GeV}/c^2$ (95% CL) を得た.

また, トップクォーク対生成機構とスピン偏極度相関の研究を継続して行った. 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. 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ので, パートの重心系における t クォークの飛翔方向は, 前後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

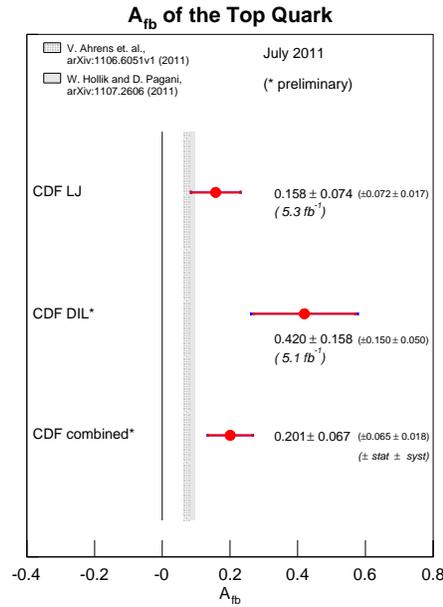


図 5: $t\bar{t}$ 対生成における前後方非対称度の測定.

むような新たな相互作用を考えれば、非対称度は予言と大きく異なる可能性がある。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。Lepton plus jets チャンネルを用いた測定も同じ傾向を示している。両者を統合すると、 $A_{FB} = +0.201 \pm 0.065 \pm 0.018$ であり、非対称度 0 とは 2.9 標準偏差だけ離れている。図 5 にこれらの結果を示す。新たな物理の兆候を示すものとして興味深い。

また、5.1 fb⁻¹ 相当の dilepton チャンネルのデータを用いて、トップ・反トップ対生成におけるスピン相関を測定し、相関係数 $-0.520 < \kappa < 0.605$ (68% CL) を得た。トップクォークは質量が大きいため、その寿命は 10^{-24} s 程度と予測される。これは、クォークのハドロ化の時間より短く、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きわめて困難あるいは不可能であるが、以上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。

(3) B 粒子の物理

陽子・反陽子衝突では b クォークの生成率が高いため、その崩壊を効率よく収集することができれば、精度の高い測定が可能となる。CDF Run-II 実験では、Silicon Vertex Trigger (SVT) と呼ばれる装置を導入した結果、 B 粒子やチャーム粒子などの長寿命粒子の崩壊物を選択的に効率よく収集することが可能となった。

クォークの種類を変える中性流による稀崩壊 $b \rightarrow s\ell^+\ell^-$ は、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 2011 年度に、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、新たな結果を得た。 b クォークを含むバリオン Λ_b^0 の崩壊 $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda^0 \mu^+ \mu^-$ が初めて観測され、また崩壊 $B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-$ および $B_d^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$ が高統計で再構成された。図 6 に、これらの信号を示す。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

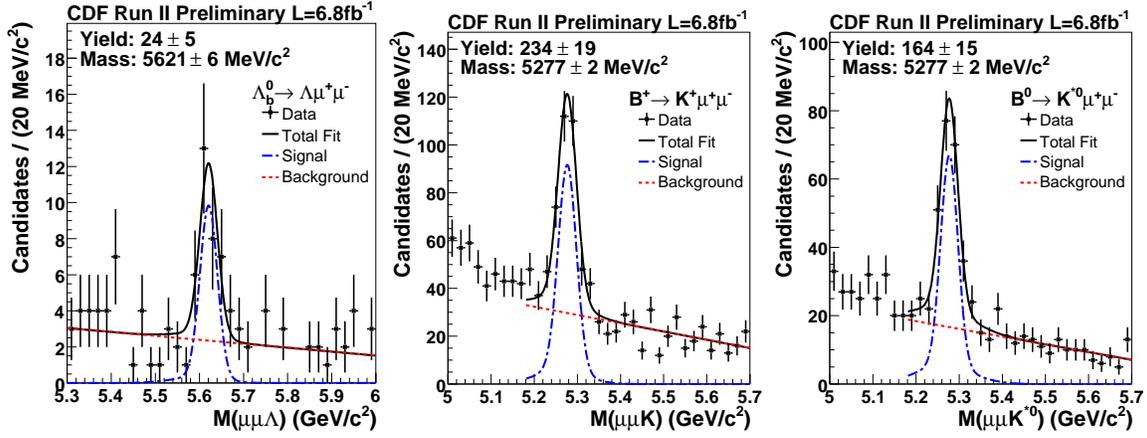


図 6: B ハドロンの稀崩壊 $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda^0 \mu^+ \mu^-$, $B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-$, および $B_d^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$ の信号.

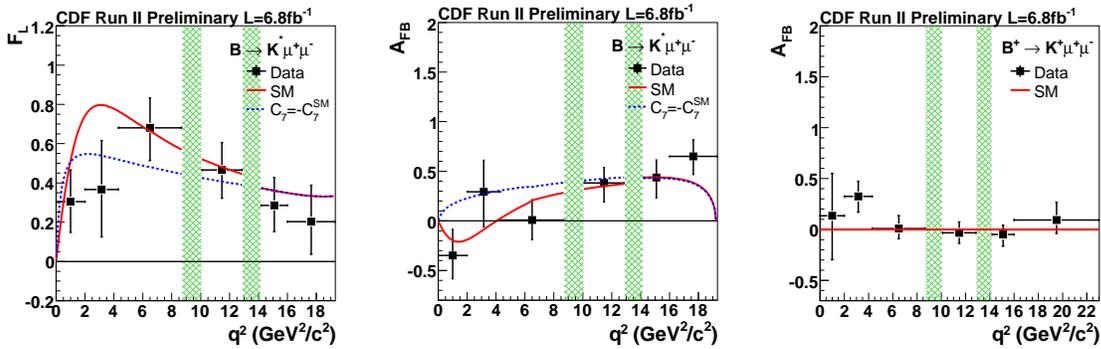


図 7: 左, 中: 崩壊 $B_d^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$ における偏極度とレプトン前後方非対称度の測定. 右: 崩壊 $B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-$ におけるレプトン前後方非対称度の測定. 分布はレプトン対質量の二乗の関数として示されている.

が新物理の探索に感度を持つ. 図 7 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.

(4) 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 $p\bar{p} \rightarrow b\bar{b}X$ 過程による背景事象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 $p\bar{p} \rightarrow HWX \rightarrow b\bar{b}\nu X$ を用いる. 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

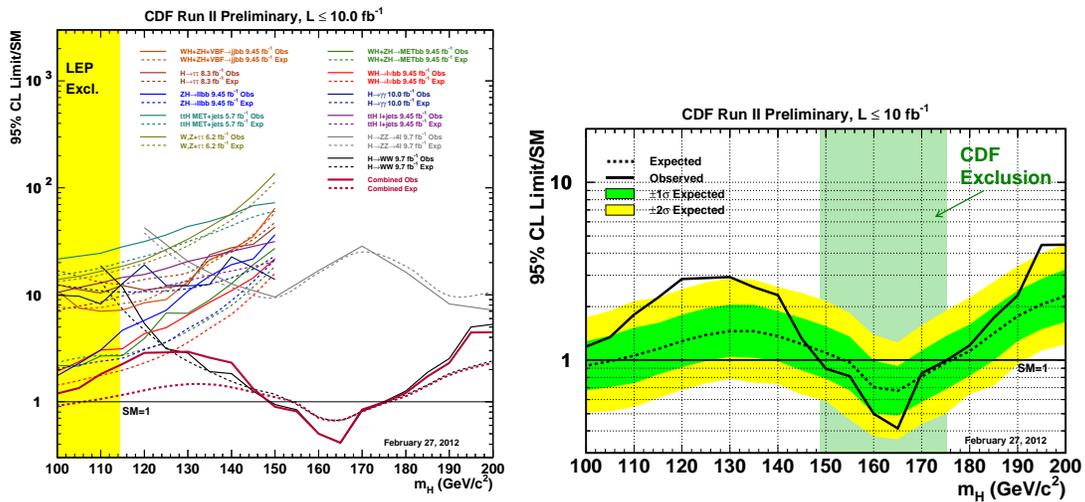


図 8: CDF 実験での標準模型ヒッグス粒子探索の結果. 生成断面積の上限 (観測値) の理論値に対する比を質量の関数として示したもの. CDF 実験の個々の探索結果 (左) とすべての結果を総合したもの (右).

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を探索し, ヒッグス粒子生成に対する上限を設定した. 図 8 (左) に個々の探索チャンネルにおける生成断面積の上限値と標準理論予言値との比を, 同 (右) にすべてのチャンネルを統合した結果を示す. 質量 160 GeV/c² 付近では, 上限値は予言値を下回り, 質量領域 $148.8 < m_H < 175.2$ GeV/c² の標準理論ヒッグス粒子を棄却した. 一方, 低質量領域では実際に観測された上限値は, ヒッグス粒子がないと仮定した場合に期待される上限値を上回る. これは, 質量 120 GeV/c² 付近に, ヒッグス粒子の信号と矛盾しない事象が, 期待される背景事象を超過して観測されたためである. この超過を信号と仮定した場合の生成断面積を図 9 に示す. 標準理論の予言値と矛盾しない.

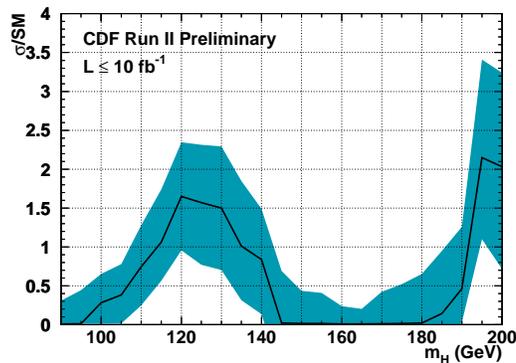


図 9: CDF 実験での標準模型ヒッグス粒子探索の結果. ヒッグスの信号が存在すると仮定してその生成断面積の理論値に対する比を質量の関数として示したもの.

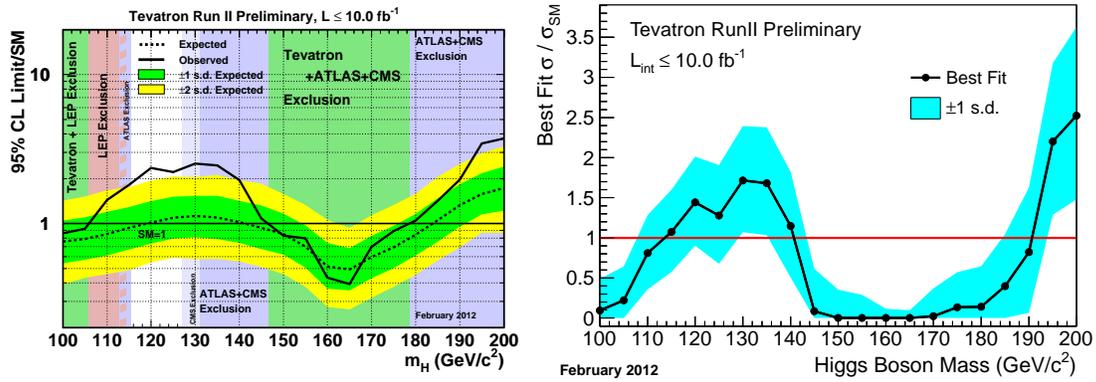


図 10: 標準模型ヒッグス粒子探索の結果。CDF 実験と D0 実験の結果を統合したもの。生成断面積の上限（左）と信号を仮定した場合の生成断面積の中心値（右）を理論値で規格化して質量の関数として示す。

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生成断面積の上限値および中心値を図 10 に示す。棄却された質量領域は $147 < M_{\text{Higgs}} < 179 \text{ GeV}/c^2$ である。低質量領域では、ヒッグス粒子の信号と矛盾しない事象が存在する。

以上に CDF 実験において平成 23 年度に得られた主な成果を述べた。同実験は、米国 2011 年度末をもって運転を終了したが、今後も 1～2 年は物理解析を継続し、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、2011 年 3 月より 2010 年に引き続き重心系エネルギー 7 TeV での陽子陽子衝突を継続し、10 月末までに積算輝度 5.25 fb^{-1} を記録し、陽子陽子瞬間衝突輝度としては $3.65 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を達成した。11 月には核子あたり 2.76 TeV での鉛-鉛衝突実験を 1 ヶ月間行い、 $158 \mu\text{b}^{-1}$ の重イオン衝突の事象を収集した。

2012 年にさらに $15\text{--}20 \text{ fb}^{-1}$ のデータを収集したのち、2 年弱のシャットダウンを経て、設計エネルギー 14 TeV、設計瞬間輝度 $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を達成する予定である。2022 年からは、LHC の設計値を超えた高輝度実験、HL-LHC 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) ヒッグス粒子の探索

ヒッグスは質量の起源とされる粒子で、素粒子の標準模型では唯一未発見であり、ATLAS 実験はその探索を最大の目標としている。

ヒッグス粒子の崩壊分岐比は質量に依存するため、最も感度の高い探索モードも質量によって変る。図 11 に様々のヒッグス粒子探索の結果をまとめた。ヒッグスの存在は、LEP 実験により $114 \text{ GeV}/c^2$ 以下は否定され、今までの様々の測定からは間接的に $185 \text{ GeV}/c^2$ 以上は存在

しないだろうとされている。これらの領域やテバトロン実験からの直接除外領域を含め、広い範囲で存在を否定した。2011年のデータからは、存在が否定できない領域は115-130 GeV/c²に絞られた。特に125 GeV/c²近辺は、信号が無い場合に予想される棄却感度が達成できていない。何らかの超過事象が観測されたため、ヒッグス粒子存在の可能性がある。

図12は、この領域での事象数を背景事象のみで説明できる確率を縦軸にして主要探索モードに分けて示す。最も感度の高いモードは質量再構成分解能に優れた、 $H \rightarrow \gamma\gamma$, $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow llll$ であるが、これらで125-126 GeV/c²をピークとして背景事象だけでは説明できない事象が観測された。これら以外の $H \rightarrow bb$, $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow l\nu l\nu$, $H \rightarrow \tau\tau$ での探索では質量分解能が限定的なためにピークにはならなかったが、すべてを統合した探索結果では2.6 σ に相当する背景事象では説明できない超過がみられる。事象数が限られる探索では、たまたまこのように見られる効果も考えなくてはならないが、それを考慮しても2.4 σ に相当する。

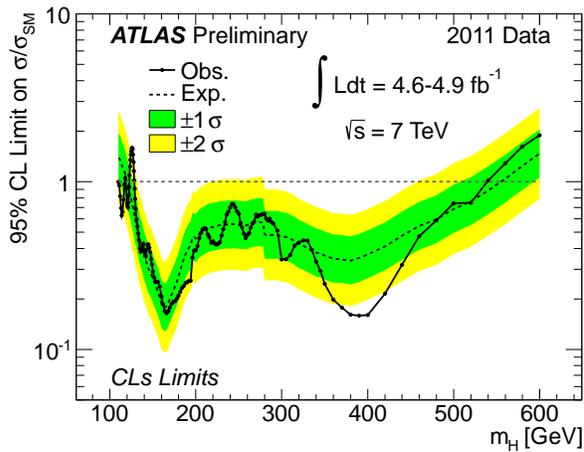


図11: ヒッグス粒子探索の結果。縦軸は標準模型ヒッグスの生成断面積で規格化した95%信頼度での生成断面積の上限を示すもので、1を下回る測定値(実線)の領域では、標準模型ヒッグスの存在は除外される。破線は、実験装置の感度から予測される除外領域の中心値で、帯はその1および2標準不確かかの範囲を示す。

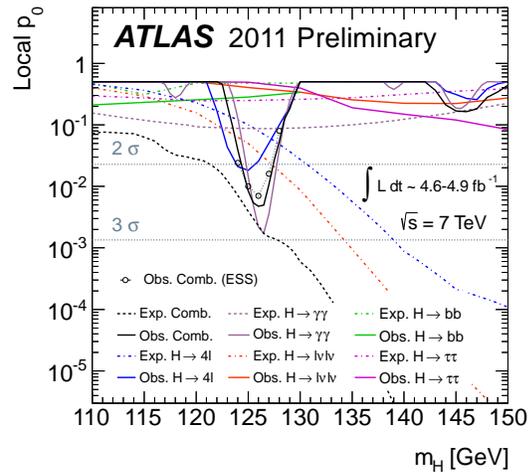


図12: 125 GeV/c²近辺において背景事象のみで説明できる確率。主要5探索モードでの結果を測定値を実線で、(背景事象だけの場合からの)予測値を破線で示す。統合結果は2.6 σ 、もしくはこのようなずれがどこでも起りうる(ESS)場合を考慮すると2.4 σ で説明できない事象超過がある。

新粒子の発見には5 σ 以上の超過が必要とされ2011年の結果はまだ不十分である。統計量を上げ、また他の探索モードでも信号を確認することが不可欠であるが、2012年の測定によりその結論が得られる予定である。ヒッグス粒子の存在は、素粒子物理学の標準模型の完成に不可欠のものであるが、同時に真空の概念を一新し、初期宇宙で重要な役割を果す粒子を捉えることにもなる。

ヒッグス粒子については単に存在の検証に留まらず、その性質の研究が重要となる。特にヒッグス粒子とフェルミ粒子との結合を測定し、結合の強さがフェルミ粒子の質量に比例するか(湯川結合)の検証は標準模型ヒッグスの理解に不可欠である。我々は τ レプトンへの崩壊 $H \rightarrow \tau\tau$ に注目した解析を継続している。

τ 粒子にはハドロン終状態(τ_h)とレプトン終状態(τ_ℓ , $\ell=e, \mu$)に崩壊するモードがある。

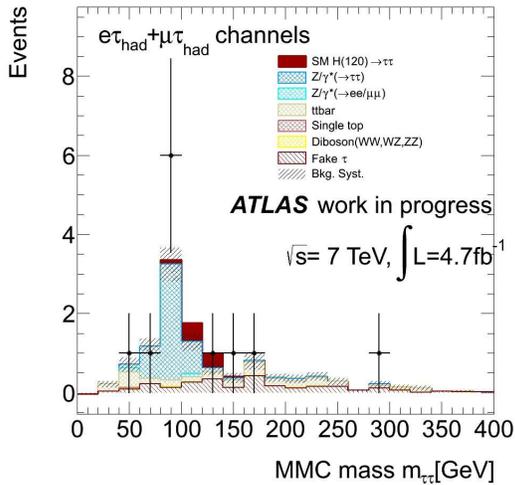


図 13: レプトン+ハドロン終状態での $qq \rightarrow qqH$ 検出に特化した信号選択をした事象の $\tau\tau$ 不変質量の分布. 120 GeV/c^2 ヒッグスと背景事象の予想分布と 2011 年データとの比較.

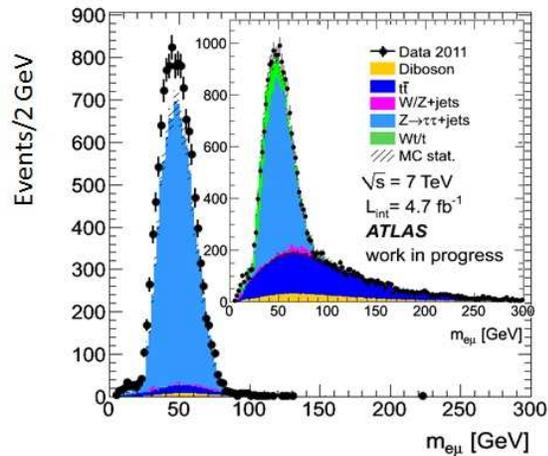


図 14: 電子+ミュー粒子終状態での $Z \rightarrow \tau\tau$ 事象の $e-\mu$ 不変質量の分布. ニューラルネット分別を適用前後 (挿入図は適用前) することで背景事象が大きく抑制でき, ヒッグス粒子に対応する信号を分離しやすくなる.

レプトン終状態にはニュートリノが含まれるので τ の再構成精度が限定的であるがハドロン終状態では背景事象となるジェットの除去が課題である. 最も大きな背景事象である $Z \rightarrow \tau\tau$ とは質量の違いを用いて区別するため, 背景事象の除去と質量再構成精度が共に必要となる. 現在 2 種類の探索法を検討している.

最初の方法では, 2 つの τ 粒子に対して, τ_h, τ_ℓ をひとつずつ選別し, 特にヒッグス生成が多くなる $qq \rightarrow qqH$ の生成モードに特化した選択をする. 図 13 はそのような事象選択後の $\tau\tau$ 系の不変質量分布である. 2011 年データからは 12 事象が観測されたが殆どは Z の背景事象であると評価されている. 統計を増すことで Z 質量分布の肩 (図ではヒッグス質量 $120\text{GeV}/c^2$ を仮定) に信号が捉えられることが期待できる.

第 2 は, 両方ともにレプトン終状態を用い, 運動量測定精度の優れた背景事象の少ない電子とミュー粒子のみで組んだ不変質量を測定する方法である. 図 14 は $Z \rightarrow \tau\tau$ を捉えることで解析方法を検証を示すもので, ニューラルネットに基づく信号分別の有無での質量分布を比較し, ニューラルネットにより背景事象を大きく抑制できることを示している.

(2) 標準模型の物理

7 TeV 陽子陽子衝突での標準模型粒子の生成断面積を測定して理論予想と比較した. 図 15 に示すように, トップクォーク対生成, 単独トップクォーク生成やゲージボゾン対生成いずれも不確かさの範囲で理論値と良い一致を示している. トップ対生成については, 新たに τ +jets 終状態と全ジェット終状態の測定を加えた.

トップクォークの質量測定はレプトン+ジェット終状態で測定し 172.8 ± 0.7 (統計+ JES) ± 0.8 (系統) GeV/c^2 を得た. テバトロン実験の統合結果 173.2 ± 0.6 (統計) ± 0.8 (系統) GeV/c^2 と不確かさの範囲で一致するが系統不確かさが劣る. ジェットのエネルギー絶対値など検出器性能のより一層の理解が系統不確かさを縮小させるために必要である.

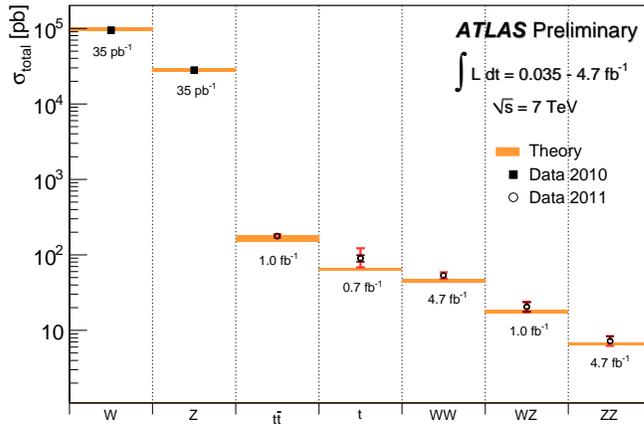


図 15: $\sqrt{s}=7$ TeV でのいくつかの標準模型粒子生成断面積の測定値と理論予想値との比較。

(3) 標準模型を超える物理の探索

エネルギー最前線の LHC 実験では、標準模型を超える粒子の探索は重要である。7 TeV エネルギーでは新たな粒子の徴候は見られず、図 16 および図 17 に 95%信頼度で棄却した存在下限質量をまとめて示す。

超対称性 (SUSY) は階層性の問題を解決するために最も注目され、対応する SUSY 粒子が 1 TeV の質量領域に存在することが期待されている。また、最も軽い中性 SUSY 粒子は暗黒物質の候補に成り得るので宇宙論にも重要な探索とみなされる。SUSY にはいくつかのモデルがあるが、それらに対してクォークやグルーオンの SUSY 粒子については約 1 TeV/ c^2 までを棄却し、また第 3 世代の SUSY 粒子、安定重粒子の生成などについての探索を行っている。

余剰次元は理論モデルおよび設定パラメータによりまた探索モードにより 1-4 TeV/ c^2 までの質量を棄却した。新しい相互作用が出現する実効質量は、トップ以外のクォークやレプトンに限ると約 10 TeV/ c^2 、トップと結合する相互作用に限ると 1.7 TeV/ c^2 までを棄却した。重いゲージボソンは 2.2 TeV/ c^2 、レプトクォークは 0.66 TeV/ c^2 、重いクォークは 0.35-0.48 TeV/ c^2 までを棄却した。その他、クォークの励起状態などについても従来の探索範囲を超えて存在を否定した。

重い新粒子の探索能力は衝突エネルギーに強く依存するので、2012 年の 8 TeV、2015 年以降の 14 TeV でも引き続き探索は継続される。

(4) HL-LHC に用いる p 型シリコン検出器の開発

2012 年の衝突エネルギーと衝突輝度の達成目標は、8 TeV および $5 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ である。設計エネルギー (14 TeV) と設計衝突輝度 $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ はともに 2015 年以降に達成する計画である。その後も継続して統計精度を向上させるために、2022 年からは、LHC の設計値を超えた高輝度 LHC (HL-LHC) 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を超え、また、粒子数密度も増大するため、それに伴う新しい内部飛跡検出器の開発研究も行っている。

HL-LHC 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。この開発は 6 年間継続し、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 P-STOP を電極分離の構造とし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、HL-LHC の高放射線線量 (1×10^{15} 1-MeV $n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$) を受けて

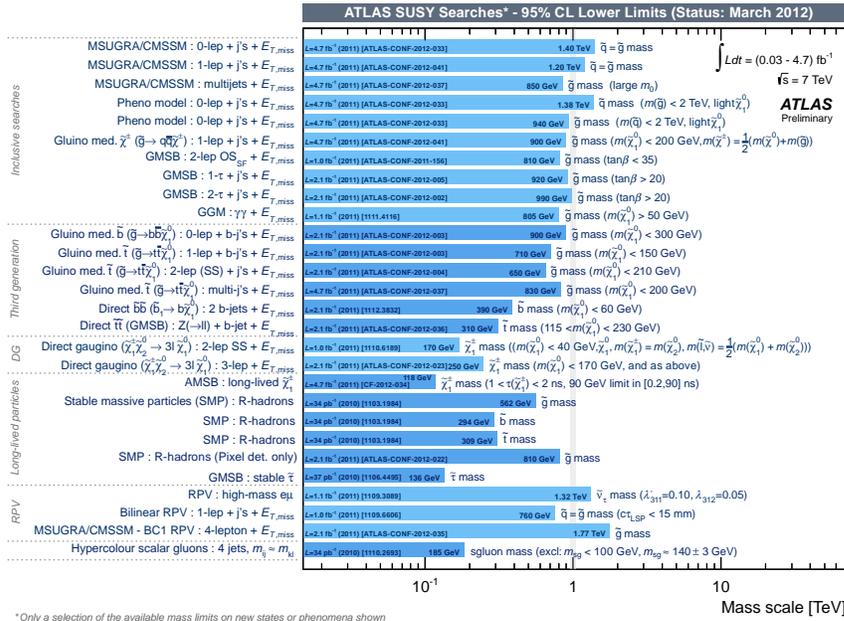


図 16: $\sqrt{s}=7 \text{ TeV}$ でのいくつかの超対称性標準粒子に対する 95% 下限質量。

も使用可能な設計を確立した。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もセンサーを保護するパンチスルー機能の時間特性を評価している。

2011 年度は、主に $^{60}\text{Co} \gamma$ を HL-LHC の運転時に近い線量率で照射し、センサーの低線量での振る舞いを詳細に調べた。HL-LHC での線量率は最大 20 Gy/h 程度なので、その条件に近い状態で予定する最大バイアス電圧 500 V まで安定して作動するかを評価した。

図 18 は、未照射のセンサーを用いて様々な照射率とバイアス電圧を与えた場合、安定して作動する領域を示す。各条件で電極ピッチの異なる 2 種のセンサー ($Z3=74.5\mu\text{m}$, $Z6=100\mu\text{m}$) について測定した結果、高照射率であるほど、また高バイアス電圧であるほど不安定になり電極間隔が広い Z6 の方が不安定となる領域が狭い。センサーの全空乏化電圧は 180 V なので、200 V を下回るバイアスで不安定になると使用しにくい。図 18 には未照射のセンサーに対する安定性を示したが、一度照射したセンサーは安定性が増すことを系統的な照射実験により示すことができた。安定化する線量は約 100 Gy でこれを超えて照射したセンサーは例えば 50 Gy/h, 700 V の条件でも安定して作動し、再照射の間隔が 3 週間の場合でも同様の結論が得られた。そのため、線量率が徐々に上がる実際の環境下では実用上の問題は無いと結論を得た。

センサーが不安定になるのは、暗電流値が急激に上昇することによるもので、この現象は局所的な高電場に起因するマイクロ放電と呼ばれる現象であるが、マイクロ放電の際には結晶振動に基づく熱が発生する。そのような熱分布を冷却 CCD カメラで赤外光を撮影することでマイクロ放電の場所を特定した。図 19 は不安定となったセンサーに対する撮影結果で、電極のコーナー部であることが分かる。この様なコーナー部には電場が強くなり多くの電流が集中する。線量率が高いほど、また電極ピッチが広いほど電流集中が大きくなりバイアス電圧が高いほどマイクロ放電での電流増幅が大きくなり、測定結果を定性的に説明できる。この電極は電場を形成する電極とパルス信号を読み出す電極が絶縁膜を隔てて配置されている。一旦放射線を浴びるとこの絶縁膜にホールが蓄積し、対向するシリコン表面には電子が蓄積されることになる。この電子は電場集中を緩和する役割を果たすので、照射とともに安定性が向上する現象も説明できる。

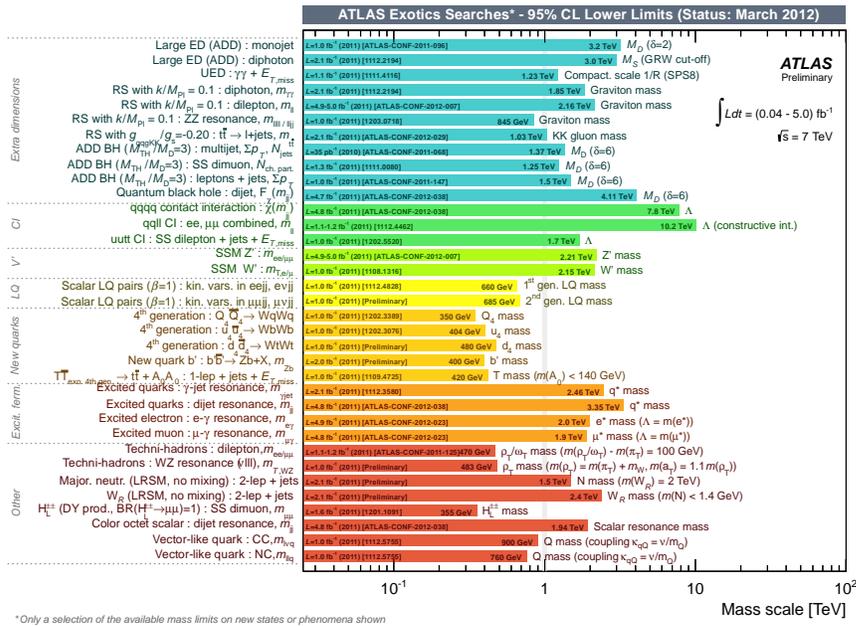


図 17: $\sqrt{s}=7$ TeV でのいくつかの標準模型を超える粒子の95%下限質量。

(5) 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し荷電粒子を検出するために、Lapis セミコンダクター社の 0.20 μ 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、荷電粒子の多重散乱を抑えるために物質量を減らす要請がある。読み出し回路一体型した SOI デバイスにとって、同時に十分に高い信号ノイズ (S/N) 比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。また高速に電荷収集できる全空乏化も望ましい。

SOI ウェハはチョクラルスキ (Cz) 法で結晶化したシリコンを用いているが、より高純度のデバイスを実現するために FZ 法での試作も行なった。FZ 法では厚い (500 μ m) デバイスでも全空乏化が可能で、硬 X 線やガンマ線の検出への応用利点が挙げられるが、デバイス設計上では p 型と n 型の両タイプが指定できることがある。これにより放射線耐性設計の可能性が広げられる。

薄型化は前年度に行った 8 インチウェハごと 100 μ m まで薄くすることに加え、チップ単位での 50 μ m までの薄型化を行った。赤外レーザーや赤色レーザーによる実験室での評価とともに CERN でのハドロンビームでの信号読み出し試験を行った。図 20 には 100 μ m 厚のデバイスに対する SN 比の測定結果を示す。飛跡検出器としての要請 S/N20 を達成し、いずれのデバイスも十分な性能を実証できた。

SOI デバイスを荷電粒子測定に適用できたブレイクスルーは埋め込み電極の採用であるが、その設計によりアンプ入力電圧が変わり放射線耐性も依存する。適用する放射線環境に応じた設計をし、また回路処理部もチップ一体化する実用設計が今後の課題である。

		Radiation rate															
		2Gy/h	3Gy/h	4Gy/h	5Gy/h	10Gy/h	20Gy/h	100Gy/h	100Gy/h								
Vb at Irad	200V	✓ 32	✓ 32	---	---	---	---	✓ 15	✓ 15	✓ 100	✓ 100						
	300V	---	---	---	✓ 16	✗ 13	✓ 20	✗ 13	✓ 40	✗ 18	✗ 16	✗ 9	✗ 20	✗ 15			
	400V	✓ 32	✓ 32	✓ 57	✓ 57	✓ 76	✗ 8.5	✓ 12	✗ 6.3	---	---	✗ 8.7	✗ 5.7	✗ 13	✗ 10		
	500V	---	---	---	---	---	---	✗ 13	✗ 7.5	---	---	---	---	---	---		
	600V	✓ 32	✓ 32	✓ 57	✗ 8.7	✗ 12	✗ 6	✗ 9.6	✗ 5.8	---	---	✗ 7.7	✗ 5.3	✗ 12	✗ 8.3		
	800V	✓ 9.2	✗ 6	---	---	---	---	✗ 9.2	✗ 6.6	---	---	---	---	✗ 8	✗ 5.7	✗ 10	✗ 6.7

図 18: 未照射センサーに対して照射率とバイアス電圧を変えて測定した安定性の結果。不安定となった照射量 (Gy) を 2 種類のセンサーについて示す。枠内の条件は安定である領域 (数値は安定であると判定した照射量) で、照射率が低いほどまたバイアス電圧が低いほど安定動作する。

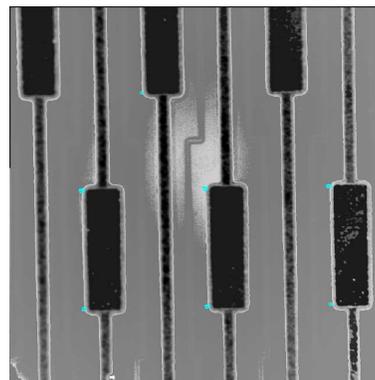


図 19: マイクロ放電で発生する熱を撮影した画像。電極のコーナー部でマイクロ放電が発生し不安定となる。

【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 検出器のうち、電磁カロリメータ (ECal) の研究開発を行なっている。ILD の電磁カロリメータでは、候補の一つとして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考えられている (図 21)。

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。このような細分割を実現するために、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が、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では、なく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、使用が前提となる。

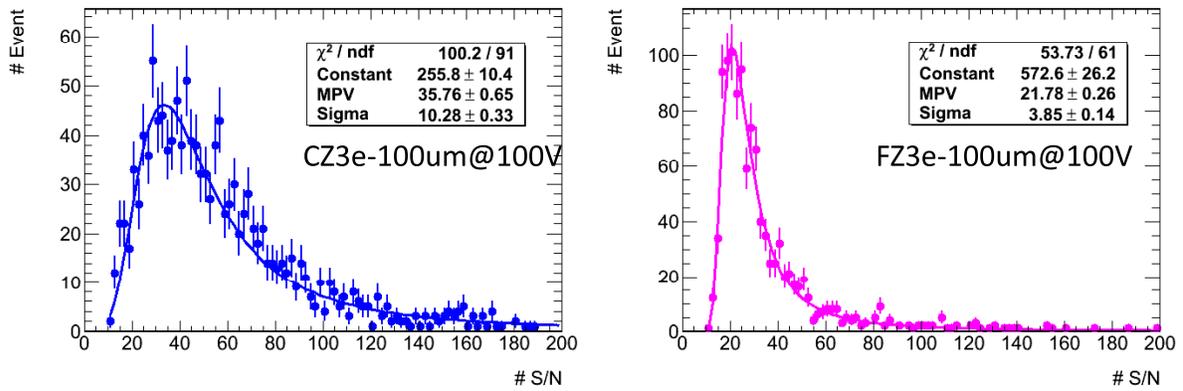


図 20: 100 μm に薄型化したセンサーの高エネルギー荷電粒子への応答。横軸は信号ノイズ比。Cz 法と FZ 法で作製したウェハでの比較。

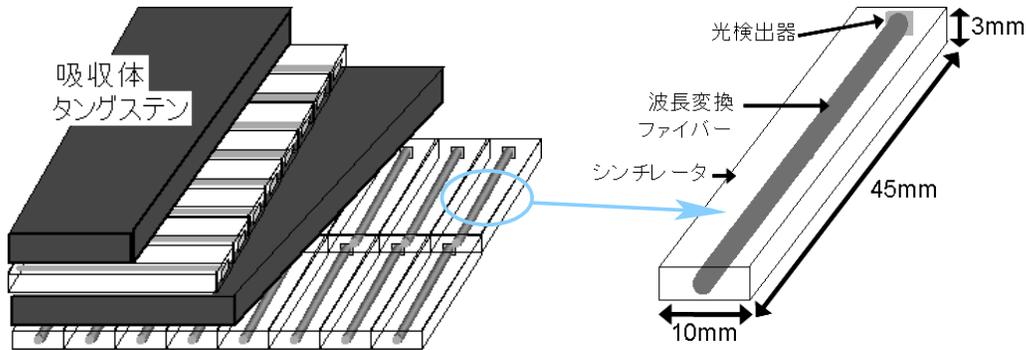


図 21: ILC(ILD) 検出器の電磁カロリメータ候補の一つ。カロリメータは、吸収体とシンチレータ層をもつサンプリングカロリメータとなっており、シンチレータ層は、ストリップシンチレータを横方向と縦方向を交差させ並べた構造になっている。またストリップシンチレータは波長変換ファイバーが埋め込まれ、光検出器によって読み出される。

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。更に、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行ってきた。

カロリメータの分解能を決める一つの要因は、センサーの線形応答性である。MPPC は、非常に短い光パルスに対しては、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。このため、MPPC のピクセル数が多ければ多い程光パルス入力に対する応答の線形性は、向上する。

我々は、新たに浜松ホトニクスが開発した 2500 ピクセルの性能を見るため 40ps の短パル

ス光の近紫外光レーザを用い、線形応答性を測定した。図 22 は、2500 ピクセルと 1600 ピクセルの MPPC のレーザ光に対する出力ピクセル数の入射光量依存性を示したものである。入射光量は、光電子増倍管をリファレンスとし、2500 ピクセルと 1600 ピクセルの MPPC で入射光子数が同じになるように規格化してある。短パルス光に対しては、2500 ピクセル

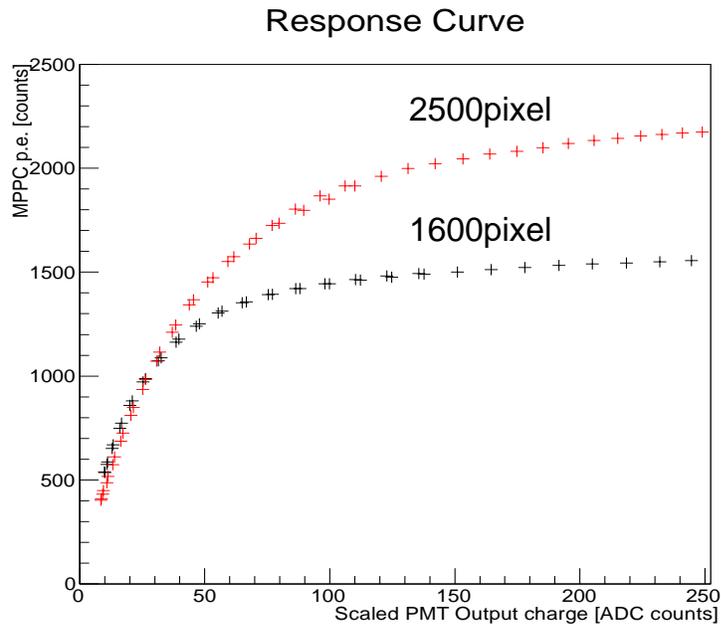


図 22: 2500 ピクセルと 1600 ピクセルの MPPC のレーザ光に対する出力ピクセル数の入射光量依存性。

の方が明らかに線型性が良いことがわかる。

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。

今後は、2500 ピクセルの MPPC を用い、より実機に近い光パルス入力における応答を測定し、1600 ピクセルの場合と比較する必要がある。

【4】 超伝導体赤外線検出器の開発

過去 10 年間に超伝導トンネル接合素子 STJ (Superconducting Tunnel Junction) を用いた光検出器の開発研究が世界で広く行われてきた。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 を用いた Nb/Al-STJ や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) 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 10^{17} 年程度まで短くなる可能性がある。

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放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% 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、Hf-STJ 開発を進めてきた。これまで、Hf 成膜、Hf 膜のパターン加工方法の確立を行った。2010 年度には、初めて Hf-STJ の試作機においてジョセフソン電流を確認し、SIS 構造の作成に成功した。ただし、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。

Hf-STJ の開発とは、別に既に作成方法の確立している Nb/Al-STJ を用いた一光子分光検出器の開発も行っている。Nb の超伝導ギャップエネルギー (3.1 meV) を考慮すると、我々が目標としている 30 meV の光子に対して Nb/Al-STJ 単体では、十分なエネルギー分解能を得られない。そこで、分光は回折格子を用い Nb/Al-STJ のセルをアレイ状に並べ、Nb/Al-STJ は、光子計数のみを行わせることによってエネルギー測定を行う。

Nb/Al-STJ に対する要求は、30 meV (波長 $50 \mu\text{m}$) の一光子を検出することであるが、現在は可視光を大光量パルスを用いた読み出し系のテストを行っている。

図 23 は、可視光 (波長 470 nm) の大光量レーザ光パルスに対する Nb/Al-STJ の応答を示す。

可視光大光量パルス光に対する応答が確認できたので、今後は、これを可視光一光子、近赤外光一光子、遠赤外光一光子に対する応答を見るべく、準備を進めている。

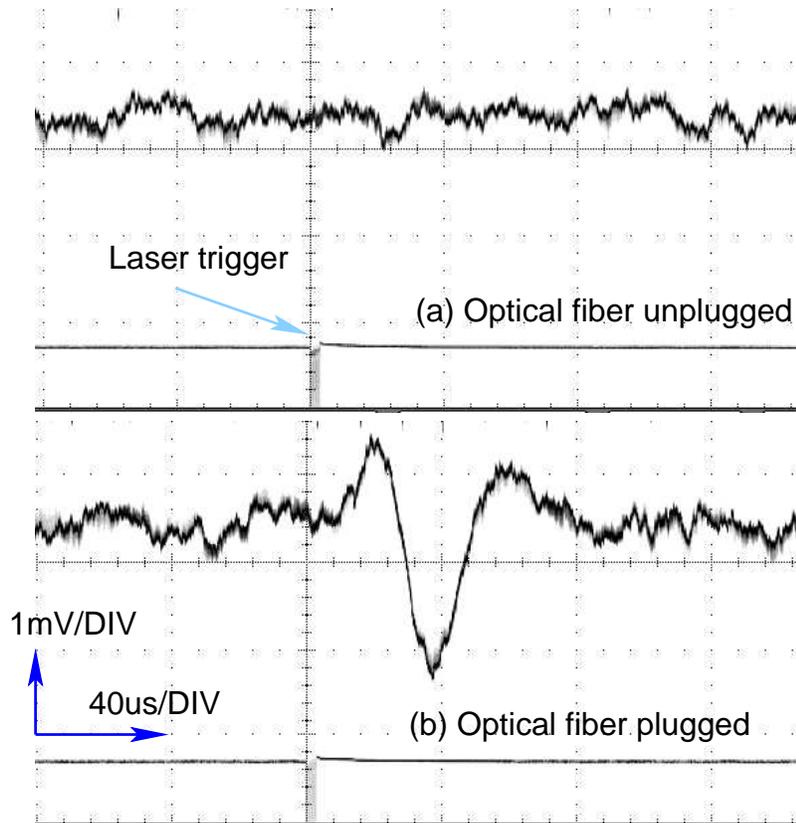


図 23: 図 23 は、可視光 (波長 470 nm) の大光量レーザ光パルスに対する Nb/Al-STJ の信号のアンプ出力. レーザ光パルスは、30 パルスを 10MHz で点灯させている. 1 パルスあたりの光子数は、 $\sim 10^5$. (a) 光ファイバーを差してないとき. (b) 光ファイバーを差したとき.

【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: 29,000 千円, 旅費: 8,000 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 14,600 千円 (直接経費 14,600 千円)
3. 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) 1,430 千円 (直接経費 1,100 千円, 間接経費 330 千円)
4. 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) 1,820 千円 (直接経費 1,400 千円, 間接経費 420 千円)

【6】 研究発表

(1) 学会誌等への発表論文

1. “Top-quark mass measurement using events with missing transverse energy and jets at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **107**, 232002 (2011).
2. “Measurements of branching fraction ratios and CP-asymmetries in suppressed $B^- \rightarrow D(\rightarrow K^+\pi^-)K^-$ and $B^- \rightarrow D(\rightarrow K^+\pi^-)\pi^-$ decays,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **84**, 091504 (2011).
3. “Search for resonant production of $t\bar{t}$ decaying to jets in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **84**, 072003 (2011).
4. “Measurement of the top-quark mass in the lepton+jets channel using a matrix element technique with the CDF II detector,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **84**, 071105 (2011).
5. “Search for new physics in high p_T like-sign dilepton events at CDF II,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **107**, 181801 (2011).
6. “A search for resonant production of $t\bar{t}$ pairs in 4.8 fb^{-1} of integrated luminosity of $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **84**, 072004 (2011).

7. “Measurement of polarization and search for CP-violation in $B_s^0 \rightarrow \phi\phi$ Decays,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **107**, 261802 (2011).
8. “Observation of the Ξ_b^0 baryon,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **107**, 102001 (2011).
9. “Search for a heavy top-like quark in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **107**, 261801 (2011).
10. “Observation of the baryonic flavor-changing neutral current decay $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda\mu^+\mu^-$,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **107**, 201802 (2011).
11. “Search for new T' particles in final states with large jet multiplicities and missing transverse energy in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **107**, 191803 (2011).
12. “Search for $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ and $B^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ decays with CDF II,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **107**, 191801 (2011); Phys. Rev. Lett. **107**, 239903(E) (2011).
13. “Measurement of the cross section for prompt isolated diphoton production in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **84**, 052006 (2011).
14. “Measurement of the cross section for prompt isolated diphoton production in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **107**, 102003 (2011).
15. “Evidence for $t\bar{t}\gamma$ production and measurement of $\sigma_{t\bar{t}\gamma}/\sigma_{t\bar{t}}$,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **84**, 031104 (2011).
16. “Measurement of branching ratio and B_s^0 lifetime in the decay $B_s^0 \rightarrow J/\psi f_0(980)$ at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **84**, 052012 (2011).
17. “Measurements of the properties of $\Lambda_c(2595)$, $\Lambda_c(2625)$, $\Sigma_c(2455)$, and $\Sigma_c(2520)$ baryons,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **84**, 012003 (2011).
18. “Improved determination of the sample composition of dimuon events produced in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Eur. Phys. J. C **71**, 1720 (2011).
19. “First search for multijet resonances in $\sqrt{s} = 1.96$ TeV $p\bar{p}$ collisions,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **107**, 042001 (2011).
20. “Measurement of the $t\bar{t}$ production cross section in ppbar collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV using events with large missing transverse energy and jets,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **84**, 032003 (2011).

21. “Top quark mass measurement using the template method at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **83**, 111101 (2011).
22. “Search for a very light CP-odd Higgs boson in top quark decays from $p\bar{p}$ collisions at 1.96 TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **107**, 031801 (2011).
23. “Invariant mass distribution of jet pairs produced in association with a W boson in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **106**, 171801 (2011).
24. “Measurements of direct CP violating asymmetries in charmless decays of strange bottom mesons and bottom baryons,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **106**, 181802 (2011).
25. “First measurement of the angular coefficients 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. Rev. Lett. **106**, 241801 (2011).
26. “Measurement of event shapes in proton-antiproton collisions at center-of-mass energy 1.96 TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **83**, 112007 (2011).
27. “Measurement of the top pair production cross section in the lepton + jets channel using a jet flavor discriminant,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **84**, 031101 (2011).
28. “Search for new dielectron resonances and Randall-Sundrum gravitons at the Collider Detector at Fermilab,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **107**, 051801 (2011).
29. “Limits on anomalous trilinear gauge couplings in $Z\gamma$ events from $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **107**, 051802 (2011).
30. “Measurement of the mass difference between t and \bar{t} quarks,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **106**, 152001 (2011).
31. “Search for production of heavy particles decaying to top quarks and invisible particles in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **106**, 191801 (2011).
32. “Measurement of the B_s lifetime in fully and partially reconstructed $B_s \rightarrow D_s^-(\phi\pi^-)X$ decays in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **107**, 272001 (2011).
33. “Search for new heavy particles decaying to $Z^0 Z^0 \rightarrow \ell\ell\ell\ell, \ell\ell jj$ in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **83**, 112008 (2011).

34. “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], Phys. Rev. D **83**, 052012 (2011).
35. “Search for the Higgs boson in the all-hadronic final state using the CDF II detector,”
T. Aaltonen *et al.* [The CDF Collaboration], Phys. Rev. D **84**, 052010 (2011).
36. “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.* [The CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **106**, 141803 (2011).
37. “Measurement of the top quark mass in the lepton+jets channel using the lepton transverse momentum,”
T. Aaltonen *et al.* [The CDF Collaboration], Phys. Lett. B **698**, 371 (2011).
38. “Search for high mass resonances decaying to muon pairs in $\sqrt{s} = 1.96$ TeV $p\bar{p}$ collisions,”
T. Aaltonen *et al.* [The CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **106**, 121801 (2011).
39. “Measurement of the forward-backward asymmetry in the $B \rightarrow K^{(*)}\mu^+\mu^-$ decay and first observation of the $B_s \rightarrow \phi\mu^+\mu^-$ Decay,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **106**, 161801 (2011).
40. “Evidence for a mass dependent forward-backward asymmetry in top quark pair production,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **83**, 112003 (2011).
41. “Search for a new heavy gauge boson W' with electron + missing E_T event signature in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **83**, 031102 (2011).
42. “Measurement of b hadron lifetimes in exclusive decays containing a J/ψ in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s}=1.96\text{TeV}$,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **106**, 121804 (2011).
43. “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], Phys. Rev. D **83**, 031104 (2011).
44. “Search for Randall-Sundrum gravitons in the diphoton channel at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **83**, 011102 (2011).
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], Phys. Rev. D **83**, 071102 (2011).
46. “Measurement of the B^- lifetime using a simulation free approach for trigger bias correction,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **83**, 032008 (2011).

47. “Measurement of angular distributions of $\Upsilon(nS) \rightarrow \mu^+\mu^-$ decays at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1112.1591 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
48. “Measurement of ZZ production in leptonic final states at \sqrt{s} of 1.96 TeV at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1112.2978 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
49. “Measurement of the ratio of branching fractions $BR(\Lambda_b \rightarrow \Lambda_c 3\pi^+)/BR(\Lambda_b \rightarrow \Lambda_c 1\pi^+)$,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1112.3334 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. D)
50. “Measurement of the top quark mass in the all-hadronic mode at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1112.4891 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
51. “Observation of exclusive $\gamma\gamma$ production in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1012.3093 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
52. “Search for SM Higgs boson production in association with a W boson using a matrix element technique,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1112.4358 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. D)
53. “Measurement of CP violating phase β_s in $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$ decays,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1112.1726 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. D)
54. “Measurement of the masses and widths of the bottom baryons Σ_b^{+-} and Σ_b^{*+-} ,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1112.2808 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. D)
55. “Evidence for the charmless annihilation decay mode $B_s^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1111.0485 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
56. “Measurements of the angular distributions in the decays $B \rightarrow K^{(*)}\mu^+\mu^-$ at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1108.0695 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
57. “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.)

58. “Search for Higgs bosons produced in association with b -quarks,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1106.4782 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. D)
59. “Study of substructure of high transverse momentum jets produced in proton-antiproton collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1106.5952 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
60. “Hyperon (Λ^0 , $\bar{\Lambda}^0$, Ξ^\pm , and Ω^\pm) production 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)
61. “Search for same-sign top quark production and fourth-generation down-type quarks in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, JHEP **1204** 069 (2012).
62. “ Combined search for the Standard Model Higgs boson using up to 4.9 fb^{-1} of pp collision data at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector at the LHC ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Lett. **B710** 49 (2012).
63. “Search for the Standard Model Higgs boson in the diphoton decay channel with 4.9 fb^{-1} of pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with ATLAS ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phy. Rev. Lett. **108** 11803 (2012).
64. “Search for the Standard Model Higgs boson in the decay channel $H \rightarrow ZZ(*) \rightarrow 4l$ with 4.8 fb^{-1} of pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with ATLAS ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Lett. **B710** 383 (2012).
65. “Rapidity Gap Cross Sections measured with the ATLAS Detector in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Eur. Phys. J. **C72** 1926 (2012).
66. “Search for anomalous production of prompt like-sign muon pairs and constraints on physics beyond the Standard Model with the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Rev. **D 85** 032004 (2012).
67. “Observation of a new χ_b state in radiative transitions to $\Upsilon(1S)$ and $\Upsilon(2S)$ at ATLAS ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **108** 15201 (2012).

68. “ Search for first generation scalar leptoquarks in pp collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV with the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B709** 158 (2012).
69. “Measurement of D^* meson production in jets from pp Collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV with the ATLAS Detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Rev. **D 85** 052005 (2012).
70. “ Search for the Higgs boson in the $H\rightarrow WW^{(*)}\rightarrow l\nu l\nu$ decay channel in pp collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV with the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Rev. Lett. **108** 111802 (2012).
71. “Search for Extra Dimensions Using Diphoton Events in 7 TeV Proton-Proton Collisions with the ATLAS Detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B710** 538 (2012).
72. “Measurement of the WZ Production Cross Section and Limits on Anomalous Triple Gauge Couplings in Proton-Proton Collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV with the ATLAS Detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B709** 341 (2012).
73. “Search for Diphoton Events with Large Missing Transverse Energy with 1 fb^{-1} of 7 TeV Proton-Proton Collision Data with the ATLAS Detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B710** 519 (2012).
74. “Measurement of the production cross section for Z/γ^* 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, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Rev. **D 85** 032009 (2012).
75. “ K_s and Λ production in pp interactions at $\sqrt{s}=0.9$ and 7 TeV measured with the ATLAS detector at the LHC ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Rev. **D 85** 012001 (2012).
76. “Search for strong gravity signatures in same-sign dimuon final states using the ATLAS detector at the LHC ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B709** 322 (2012).
77. “Searches for supersymmetry with the ATLAS detector using final states with two leptons and missing transverse momentum in $\sqrt{s}=7$ TeV proton-proton collisions

- ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B709** 137 (2012).
78. “Measuring the material in the ATLAS Inner Detector with secondary hadronic interactions with 7 TeV data ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
JINST **7** P01013 (2012).
79. “Measurement of the ZZ production cross section and limits on anomalous neutral triple gauge couplings in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Rev. Lett. **108** 041804 (2012).
80. “Electron performance measurements with the ATLAS detector using the 2010 LHC proton-proton collision data” ,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Eur. Phys. J. **C72** 1909 (2012).
81. “Search for massive colored scalars in four-jet final states in $\sqrt{s} = 7$ TeV proton-proton collisions with the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Eur. Phys. J. **C71** 1818 (2011).
82. “Search for new phenomena in final states with large jet multiplicities and missing transverse momentum using $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions with the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
JHEP **1111** 099 (2011).
83. “Performance of the ATLAS Trigger System in 2010 ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Eur. Phys. J. **C72** 1849 (2011).
84. “Measurement of the inclusive and dijet cross sections of b-jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Eur. Phys. J. **C71** 1846 (2011).
85. “Search for supersymmetry in final states with jets, missing transverse momentum and one isolated lepton in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions using 1 fb^{-1} of ATLAS data ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Rev. **D 85** 012006 (2011).
86. “Search for squarks and gluinos using final states with jets and missing transverse momentum with the ATLAS detector in $\sqrt{s} = 7$ TeV proton-proton collisions ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B710** 67 (2011).

87. “Search for the Standard Model Higgs boson in the decay channel $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4\ell$ with the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B705** 435 (2011).
88. “Measurement of the jet fragmentation function and transverse profile in proton-proton collisions at a center-of-mass energy of 7 TeV with the ATLAS detector at the LHC ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Eur. Phys. J. **C71** 1795 (2011).
89. “Search for New Phenomena in $t\bar{t}$ Events With Large Missing Transverse Momentum in Proton-Proton Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS Detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Rev. Lett. **107** 231801 (2011).
90. “Search for a Standard Model Higgs boson in the mass range 200-600 GeV in the $H \rightarrow ZZ \rightarrow \ell\nu\nu$ final state with the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Rev. Lett. **107** 221802 (2011).
91. “Search for a heavy neutral particle decaying into an electron and a muon using 1 fb^{-1} of ATLAS data ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Eur. Phys. J. **C71** 1809 (2011).
92. “Search for Displaced Vertices Arising from Decays of New Heavy Particles in 7 TeV pp Collisions at ATLAS ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B707** 478 (2012).
93. “Measurement of the cross section for the production of a W boson in association with b-jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B707** 418 (2012).
94. “Measurement of the cross-section for b-jets produced in association with a Z boson at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B706** 295 (2012).
95. “Measurements of the electron and muon inclusive cross-sections in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B707** 438 (2012).
96. “Search for New Physics in the Dijet Mass Distribution using 1 fb^{-1} of pp Collision Data at $\sqrt{s} = 7$ TeV collected by the ATLAS Detector ”,

- ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Lett. **B708** 37 (2012).
97. “Measurement of the Transverse Momentum Distribution of W Bosons in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS Detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Rev. **D 85** 012005 (2012).
 98. “Measurement of the centrality dependence of the charged particle pseudorapidity distribution in lead-lead collisions at $\sqrt{s} = 2.76$ TeV with the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Lett. **B710** 363 (2012).
 99. “Measurement of the pseudorapidity and transverse momentum dependence of the elliptic flow of charged particles in lead-lead collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV with the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Lett. **B707** 330 (2012).
 100. “Search for the Higgs boson in the two photon decay channel with the ATLAS detector at the LHC ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Lett. **B705** (2012).
 101. “Performance of Missing Transverse Momentum Reconstruction in Proton-Proton Collisions at 7 TeV with ATLAS ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Eur. Phys. J. **C72** (2012).
 102. “Search for a heavy Standard Model Higgs boson in the channel $H \rightarrow ZZ \rightarrow \ell\ell q\bar{q}$ using the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Lett. **B707** 27 (2012).
 103. “A measurement of the ratio of the W and Z cross sections with exactly one associated jet in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with ATLAS ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Lett. **B708** 221 (2012).
 104. “Measurement of the W to $\tau\nu$ Cross Section in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS experiment ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Lett. **B706** 276 (2012).
 105. “Measurement of the top quark pair production cross-section in the dilepton channel”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Lett. **B707** 459 (2011).

106. “Measurement of the Z to $\tau\tau$ cross section with the ATLAS detector”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Rev. D **84** 112006 (2011).
107. “Search for dilepton resonances in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Rev. Lett. **107** 272002 (2011).
108. “Search for a heavy gauge boson decaying to a charged lepton and a neutrino in 1 fb $^{-1}$ of pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B705** 28 (2011).
109. “Inclusive search for same-sign dilepton signatures in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
JHEP **1110** 107 (2011).
110. “Measurement of the inclusive isolated prompt photon cross section in collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector using 35 pb $^{-1}$ ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B706** 150 (2011).
111. “Search for neutral MSSM Higgs boson decaying to tau+tau- pairs in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS experiment ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B705** 174 (2011).
112. “Properties of jets measured from tracks in proton-proton collisions at center-of-mass energy 7 TeV with the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Rev. D **84** 054001 (2011).
113. “Measurement of the transverse momentum distribution of Z/γ^* bosons in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B705** 415 (2011).
114. “Measurement of multi-jet cross-sections in proton-proton collisions at 7 TeV center-of-mass energy ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Eur. Phys. J. **C71** 1763 (2011).
115. “Measurement of dijet production with a veto on additional central jet activity in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
JHEP **1109** 053 (2011).

116. "Search for Diphoton Events with Large Missing Transverse Energy with 36 pb^{-1} of 7 TeV Proton-Proton Collision Data with the ATLAS Detector ",
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Eur. Phys. J. **C71** 1744 (2011).
117. "Measurement of isolated di-photon cross-section in pp collision at $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ with the ATLAS detector ",
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Rev. **D 85** 012003 (2011).
118. " Measurement of the Upsilon(1S) Production Cross-Section in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ in ATLAS ",
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B705** 9 (2011).
119. "Search for new phenomena with the monojet and missing transverse momentum signature using the ATLAS detector in $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ proton-proton collisions ",
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B705** 294 (2011).
120. "Search for Heavy Long-Lived Charged Particles with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ ",
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B703** 428 (2011).
121. "Limits on the production of the standard model Higgs boson in pp collisions at $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ with the ATLAS detector ",
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Eur. Phys. J. **C71** 1728 (2011).
122. "Measurement of the production cross section of $W\gamma$ and $Z\gamma$ at $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ with the ATLAS Detector ",
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
JHEP **1109** 072 (2011).
123. "Measurement of the WW production cross section in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ with the ATLAS detector ",
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Rev. Lett. **107** 041802 (2011).
124. "Search for pair production of first or second generation leptoquarks in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ using the ATLAS detector at the LHC ",
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Rev. **D 83** 112006 (2011).
125. "Search for Contact Interactions in Dimuon Events from pp Collisions at $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ with the ATLAS Detector ",

- ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Rev. **D 84** 011101 (2011).
126. “Measurement of the differential cross-sections of inclusive, prompt and non-prompt J/ψ production in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Nucl. Phys. **B 850** 387 (2011).
 127. “Measurement of the Inelastic Proton-Proton Cross-Section at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS Detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Nature Commun. **2** 463 (2011).
 128. “Search for an excess of events with identical flavour lepton pairs and significant missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 7$ TeV proton-proton collisions at the ATLAS experiment ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Eur. Phys. J. **C71** 1641 (2011).
 129. “Search for high mass dilepton resonances in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS experiment ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Lett. **B700** 163 (2011).
 130. “Search for supersymmetric particles in events with lepton pairs and large missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 7$ TeV proton-proton collisions at the ATLAS ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Eur. Phys. J. **C71** 1682 (2011).
 131. “Search for a heavy particle decaying into an electron and a muon with the ATLAS detector in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions at the LHC ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **106** 251801 (2011).
 132. “Search for supersymmetry in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV in final states with missing transverse momentum and b-jets ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Lett. **B701** 398 (2011).
 133. “Search for New Physics in Dijet Mass and Angular Distributions in 36 pb⁻¹ of pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV Measured with the ATLAS Detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, New J. Phys. **13** 053044 (2011).
 134. “Measurement of the Muon Charge Asymmetry from W Bosons Produced in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Lett. **B701** 31 (2011).

135. "Search for Stable Hadronising Squarks and Gluinos at the ATLAS Experiment at the LHC ",
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B701** 1 (2011).
136. "Measurements of underlying-event properties using neutral and charged particles in pp collisions at 900 GeV and 7 TeV with the ATLAS detector at the LHC ",
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Eur. Phys. J. **C71** 1636 (2011).
137. "Search for high-mass states with one lepton plus missing transverse momentum in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector ",
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B701** 50 (2011).
138. "Search for squarks and gluinos using final states with jets and missing transverse momentum with the ATLAS detector in $\sqrt{s} = 7$ TeV proton proton collisions ",
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B701**186 (2011).
139. "Measurement of Dijet Azimuthal Decorrelations in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV ",
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Rev. Lett. **106** 172002 (2011).
140. "Luminosity Determination in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS Detector at the LHC ",
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Eur. Phys. J. **C71** 1630 (2011).
141. "Charged particle multiplicities in pp interactions measured with the ATLAS detector at the LHC ",
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
New J. Phys. **13** 053033 (2011).
142. "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, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Rev. **D83** 052005 (2011).
143. "Measurement of the top quark pair production cross-section with ATLAS in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV ",
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Eur. Phys. J. **C71** 1577 (2011).
144. "Measurement of underlying event characteristics using charged particles in pp collisions at $\sqrt{s} = 900$ GeV and 7 TeV with the ATLAS Detector ",
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Rev. **D 83** 112001 (2011).

145. “Studies of the performance of the ATLAS detector using cosmic-ray muons ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Eur. Phys. J. **C71** 1503 (2011).
146. ” Punch-through protection of SSDs in beam accidents ”,
H. F.-W. Sadrozinski, K. Hara *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A536 (2011)46.
147. S. Kim *et al.* : Search for Radiative Decays of Cosmic Background Neutrino using
Cosmic Infrared Background Energy Spectrum,
JPSJ **81**, 024101 (2012)

(2) 学会・研究会での講演（国内）

1. 佐藤 構二：“CDF 実験の最新結果,”
素粒子理論サブグループセミナー (2011 年 6 月 23 日), 首都大学東京.
2. 武内 勇司：“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 2011 (2011 年 7 月 1 日-3 日),
三重県三重郡菰野町.
3. 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 2011 (2011 年 7 月 1 日-3 日),
三重県三重郡菰野町.
4. 永井 義一：“CDF における軽い質量のヒッグス粒子の探索,”
科研費特定領域研究「フレーバー物理の新展開」研究会 2011 (2011 年 7 月 1 日-3 日),
三重県三重郡菰野町.
5. 橋本 就吾：“CDF 実験 PMT 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 2011 (2011 年 7 月 1 日-3 日),
三重県三重郡菰野町.
6. 武内 勇司：“テバトロンのトップクォーク物理と BSM 探索” (シンポジウム講演),
日本物理学会 2011 年秋季大会 (2011 年 9 月 16 日-19 日), 弘前大学.
7. 永井 義一：“Tevatron での Higgs 探索” (シンポジウム講演),
日本物理学会 2011 年秋季大会 (2011 年 9 月 16 日-19 日), 弘前大学.
8. 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 (II),”
日本物理学会 第 67 回年次大会 (2012 年 3 月 24 日-27 日), 関西学院大学.
9. 倉田 正和：“CDF 実験における Dynamical Likelihood Method を用いた標準模型ヒッ
グス粒子の探索,”
日本物理学会 第 67 回年次大会 (2012 年 3 月 24 日-27 日), 関西学院大学.
10. 金 信弘：“CDF 実験の 30 年,” (招待講演)
日本物理学会 第 67 回年次大会 (2012 年 3 月 24 日-27 日), 関西学院大学.

11. 高橋優： γ 線照射による 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開発
日本物理学会 2011 年秋季大会（2011 年 9 月 16 日-19 日），弘前大学.
12. 小池憲一郎：ATLAS 検出器における μ 粒子の横方向運動量再構成精度
日本物理学会 2011 年秋季大会（2011 年 9 月 16 日-19 日），弘前大学.
13. 埴慶太：LHC-ATLAS 実験における Higgs 探索のための τ 同定の研究
日本物理学会 2011 年秋季大会（2011 年 9 月 16 日-19 日），弘前大学.
14. 望月一也：LHC-ATLAS 実験におけるレプトン崩壊モードを用いた τ 粒子検出の評価
日本物理学会 2011 年秋季大会（2011 年 9 月 16 日-19 日），弘前大学.
15. 林隆康：LHC-ATLAS 実験における W+jets 事象の生成断面積測定
日本物理学会 2011 年秋季大会（2011 年 9 月 16 日-19 日），弘前大学
16. 新庄康平: CZ 及び FZ 型 SOI ウェハを用いた一体型ピクセル検出器の放射線耐性の評価
日本物理学会 2011 年秋季大会（2011 年 9 月 16 日-19 日），弘前大学
17. 新庄康平: 高エネルギー荷電粒子検出用 SOI ピクセル検出器の開発
日本物理学会 第 67 回年次大会（2012 年 3 月 24 日-27 日），関西学院大学
18. 埴慶太: LHC-ATLAS 実験における $H \rightarrow \tau\tau \rightarrow lh$ を用いたヒッグス粒子の探索
日本物理学会 第 67 回年次大会（2012 年 3 月 24 日-27 日），関西学院大学
19. 望月一也：LHC-ATLAS 実験における多変量解析による Z 粒子 τ レプトン対崩壊の研究
日本物理学会 第 67 回年次大会（2012 年 3 月 24 日-27 日），関西学院大学
20. 武内勇司：宇宙背景ニュートリノ崩壊光子の赤外観測の可能性，
「背景放射で拓く宇宙創成の物理-インフレーションからダークエイジまで-」シンポジウム 2011，(2011 年 7 月 12 日)，宇宙航空研究開発機構相模原キャンパス
21. 永田和樹：ニュートリノ崩壊光探索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研究開発，
日本物理学会 第 67 回年次大会（2012 年 3 月 24 日-27 日），関西学院大学
22. 金井伸也：赤外線分光検出器開発のための Nb/Al STJ での可視光応答性の評価，
日本物理学会 第 67 回年次大会（2012 年 3 月 24 日-27 日），関西学院大学

(3) 非常勤講師・集中講義

1. 受川史彦：「陽子・（反）陽子衝突における素粒子物理」，大阪市立大学，2011 年 12 月 12, 13, 19 日.

(4) 国際会議・研究会での講演・ポスター発表

1. Hideki Miyake, “Improved Measurements of Decays Mediated by the $b \rightarrow s\mu\mu$ Transition at CDF,”
APS April Meeting, April 30 – May 3, 2011, Anaheim, CA, USA.
2. Yuji Sudo, “Search for a Standard Model Higgs Boson in the $H \rightarrow WW \rightarrow \ell\nu jj$ Final States at CDF,”
APS April Meeting, April 30 – May 3, 2011, Anaheim, CA, USA.
3. Masakazu Kurata, “Search for a Standard Model Higgs Boson Produced in Association with a W Boson Using a DLM and Discriminant Analysis at CDF,”
APS April Meeting, April 30 – May 3, 2011, Anaheim, CA, USA.
4. Hideki Miyake, “Observation of $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda\mu^+\mu^-$ Decay and Updated Search for non-SM Physics in $B \rightarrow K^{(*)}\mu^+\mu^-$ Decays at CDF,”
International Europhysics Conference on High Energy Physics (EPS-HEP 2011), July 21 – 27, 2011, Grenoble, Rhone-Alpes, France.
5. Hideki Miyake, “Observation of the Baryonic FCNC Decay $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda\mu^+\mu^-$ and the Angular Analysis in $B \rightarrow K^{(*)}\mu^+\mu^-$ Decays at CDF,”
Joint Experimental-Theoretical Physics Seminar, Fermilab, August 19, 2011, Batavia, IL, USA.
6. Yuji Takeuchi, “Top Quark Properties”, XXV International Symposium on Lepton Photon Interactions at High Energies, August 22 – 27, 2011, Mumbai, India.
7. Hideki Miyake, “Updated Search for non-SM Physics in $B \rightarrow K^{(*)}\mu^+\mu^-$ Decays at CDF,”
19th International Conference on Supersymmetry and Unification of Fundamental Interactions (SUSY11), August 28 – September 2, 2011, Fermilab, Batavia, IL, USA.
8. Koji Sato, “CDF (1),”
KEK Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology (KEK-PH2012), February 27 – March 1, 2012, High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba, Japan.
9. Yuji Takeuchi, “ $t\bar{t}$ Forward-Backward Asymmetry at CDF,”
KEK Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology (KEK-PH2012), February 27 – March 1, 2012, High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba, Japan.
10. Y. Takahashi, K. Hara, S. Kim, “Performance of p-bulk microstrip detector under ^{60}Co irradiated at rates expected at HL-LHC”, 8th International Symposium on Semiconductor Tracking Devices, Taipei, Taiwan, Dec 8, 2011.
11. K. Hara, “CDF Silicon Tracking Detectors, 1988-2011”, Invited talk given at 8th International Symposium on Semiconductor Tracking Devices, Taipei, Taiwan, Dec 7, 2011.

12. K. Hara, “Recent progress in SOI pixel development”, Belle Workshop, KEK, Japan, Nov. 11, 2011.
13. K. Hara, K. Sinsho, “Development of FD-SOI Monolithic Pixel Devices for High-Energy Charged Particle Detection”, IEEE Nuclear Science Symposium, Valencia, Spain Oct. 25, 2011.
14. K. Hara, “Punch through protection of microstrip detector against beam loss”, 2nd International Symposium on Technology and Instrumentation in Particle Physics, Chicago, USA, June 9, 2011.
15. S. Kim : Development of Superconducting Tunnel Junction Photon Detector using Hafnium,
The Technology and Instrumentation in Particle Physics 2011 (TIPP 2011), – June 1, 2011, Chicago/USA

(5) 会議・研究会報告書

1. K. Shinsho, K. Hara, *et al.*, “Development of FD-SOI Monolithic Pixel Devices for High-Energy Charged Particle Detection”, IEEE Nuclear Science Symposium CR N21-1, Valencia, Spain Oct. 25, 2011.

(6) 学位論文

博士論文

1. 須藤 裕司 : Search for the Standard Model Higgs Boson in $H \rightarrow WW \rightarrow \ell\nu jj$ Channel in 1.96-TeV Proton-Antiproton Collisions (1.96TeV 陽子反陽子衝突における $H \rightarrow WW \rightarrow \ell\nu jj$ 崩壊過程を用いた標準模型ヒッグス粒子の探索)
数理解物質科学研究科物理学専攻, 2012年2月.
2. 武政 健一 : Measurement of the Spin Correlation in the Top Quark Pair Production Using the Dilepton Events in 1.96-TeV Proton-Antiproton Collisions (1.96 TeV 陽子反陽子衝突におけるダイレプトン事象を用いたトップクォーク対生成事象のスピンの極度相関の測定),
数理解物質科学研究科物理学専攻, 2012年2月.

修士論文

筑波大学大学院数理解物質科学研究科物理学専攻, 2012年2月.

1. 小池憲一郎 : $Z \rightarrow \mu\mu$ 事象を用いた LHC-ATLAS 内部飛跡検出器における横方向運動量測定精度の研究
2. 新庄康平 : 高エネルギー荷電粒子検出用 SOI ピクセル検出器の開発研究

3. 高橋優 : Performance of p-Bulk Silicon Microstrip Sensors in HL-LHC Radiation Environment
4. 望月一也 : Study of $Z \rightarrow \tau\tau \rightarrow \ell\ell$ for the Higgs Boson Search with the ATLAS Experiment at the LHC

(7) 研究会の主催

1. CDF 実験日本グループ研究会
筑波大学, 2011 年 12 月 23 - 24 日.