

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
大学院生	13 名
学群 4 年次生	3 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. 本年度もそれぞれの研究活動で数多くの成果を得たが, その中でも特筆すべき成果は ATLAS 実験において質量起源のヒッグス粒子を発見したことである. 他の研究活動としては, 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. また今年度より, ミューオンラジオグラフィによる大規模構造体の内部構造透視の研究を開始した.

【1】 陽子・反陽子衝突実験 CDF

CDF 実験は, 米国フェルミ国立加速器研究所のテバトロン加速器を用いた陽子・反陽子衝突実験であり, 日本をはじめアジア, 北米, 欧州の計 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 実験が遂行されてきたが, 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. 最終的に CDF 検出器により記録されたデータ量は約 10 fb^{-1} である.

以下には, 2012 年度の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 20 年近くが経過し, 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・反クォーク対を始状態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, $m_{\text{top}} = 172.85 \pm 0.71 \pm 0.84 \text{ GeV}/c^2$ という最終結果を得た. D0 実験の測定と総合した平均値は $173.20 \pm 0.51 \pm 0.71 \text{ GeV}/c^2$ である (図 1).

また, トップクォーク対生成機構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, パートンの重心系における 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

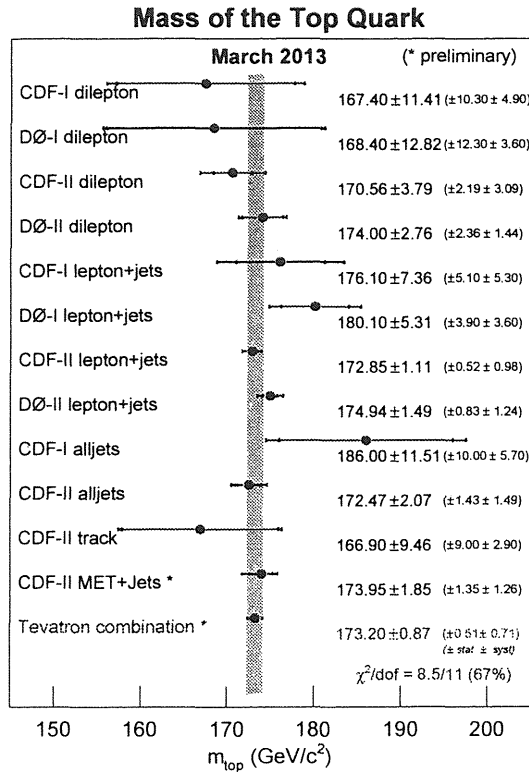


図 1: トップクォークの質量の測定.

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言される. 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. 新たな物理の兆候を示すものとして興味深い. 2012 年度には, 全データを用いた dilepton チャンネルの解析を継続し, 結果の公表に向けた調整を行っている.

(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.

クォークの種類を変える中性流による稀崩壊 $b \rightarrow sl^+l^-$ 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 実験ではこれまでこの解析を行ってきたが, 2012 年度には, Run-II 実験の全データ (9.6 fb^{-1}) を用いて新たな結果を得た. 図 2 に示すように, 崩壊 $B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-$ および $B_d^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$ などの信号が高統計で再構成された. 崩壊 $B_d^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$ は, 偏極度およびレプトン角分布の前後方非対称度が新物理の探索に感度を持つ. 図 3 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.

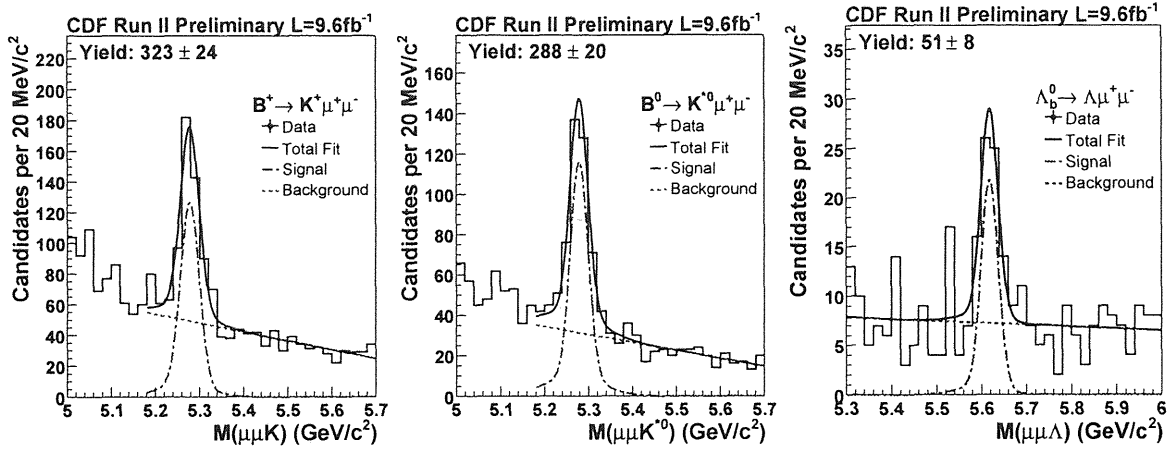


図 2: B ハドロンの稀崩壊 $B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-$, $B_d^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$ および $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda^0 \mu^+ \mu^-$ の信号。

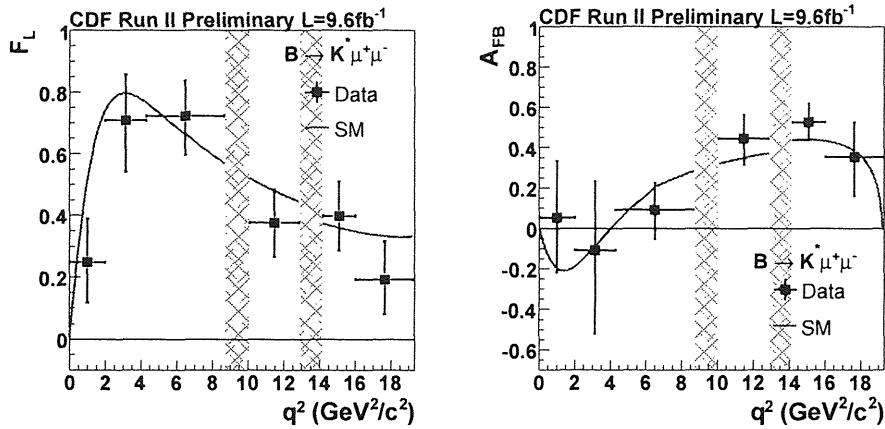


図 3: 崩壊 $B_d^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$ における偏極度とレプトン前後方非対称度の測定. 分布はレプトン対質量の二乗の関数として示されている.

(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. 2012 年夏に, LHC での ATLAS, CMS 両実験により質量 $125 \text{ GeV}/c^2$ のヒッグス粒子と思しき新粒子が発見されたが, その正体が素粒子標準理論により予言されるヒッグス粒子であるか否かは, まだ決定的な検証がなされていない. 特に, フェルミ粒子との結合が重要である.

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 $130 \text{ GeV}/c^2$ 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 $p\bar{p} \rightarrow HWX \rightarrow b\bar{b}\ell\nu X$ 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

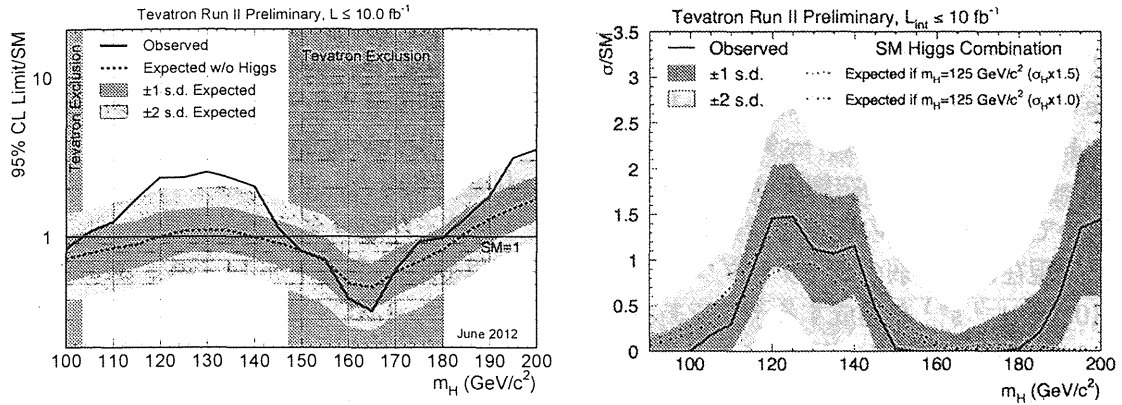


図 4: Tevatron での標準模型ヒッグス粒子探索の結果. 左: 生成断面積の上限 (観測値) の理論値に対する比を質量の関数として示したものの. 右: ヒッグスの信号が存在すると仮定してその生成断面積の理論値に対する比を質量の関数として示したものの. いずれも, CDF 実験と D0 実験の結果を総合してある.

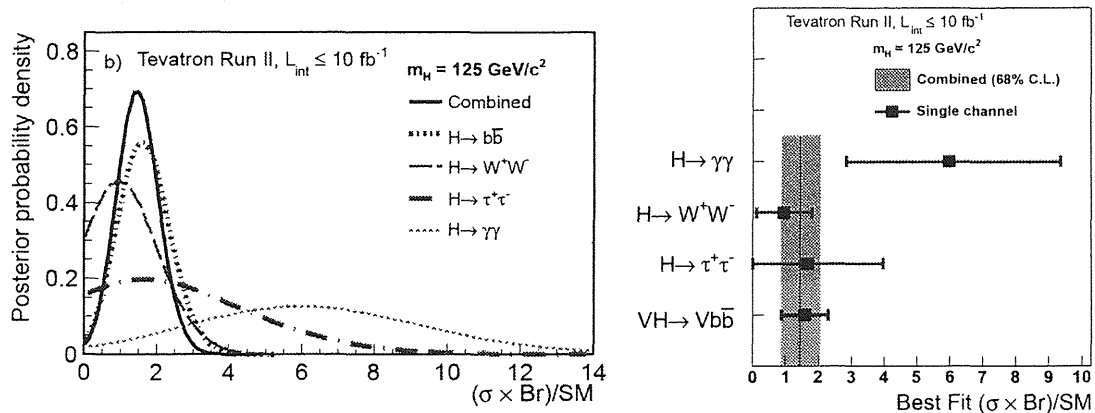


図 5: 標準模型ヒッグス粒子探索の結果. 信号を仮定した場合の生成断面積を崩壊様式ごとに示したものの.

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を探索し, ヒッグス粒子生成に対する上限を設定した. 図 4 (左) に, 生成断面積の上限値と標準理論予言値との比の, CDF 実験と D0 実験の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 $147 < m_H < 180$ 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 125 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同図 (右) に示す. また, ヒッグス粒子の崩壊様式ごとの生成断面積を図 5 に示す. 特に, $b\bar{b}$ 対との結合が標準理論の予言と矛盾しないことが示唆される.

【2】 LHC ATLAS 実験

欧州セルン研究所のLHC加速器 (Large Hadron Collider) は、2011 年は重心系エネルギー 7 TeV での陽子陽子衝突を継続し、10 月末までに積算輝度 5.2 fb^{-1} (最大瞬間衝突輝度は $3.6 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) のデータを収集した。2012 年は、8 TeV の衝突エネルギーで 23 fb^{-1} のデータ (最大瞬間衝突輝度は $7.8 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) を収集した。7 月にはそれまでのデータを用いて「新粒子」の発見を発表し、12 月には「新粒子がヒッグスと矛盾しない」と発表した。現在は 2 年弱のシャットダウン中で、再開後は設計エネルギー 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) ヒッグス粒子の発見

質量の起源とされるヒッグス粒子は、素粒子の標準模型では唯一未確認であり、ATLAS 実験はその発見を最大の目標としてきた。2011 年までのデータでは 2.6σ 程度の兆候がみられたが、データ統計量を増やすことにより新粒子の発見を確立し、2012 年末には新粒子がヒッグス粒子の性質と矛盾しないことを示した。

図 6 および図 7 は、探索モードのうち、最も感度の良い $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ (l は電子か μ 粒子) および $H \rightarrow \gamma\gamma$ の事象数を終状態の不変質量分布で示したものである。両図において、背景事象数分布 (図 6 ではシミュレーション分布、図 7 ではスムーズな分布) に加え $125 \text{ GeV}/c^2$ 辺りに超過が見られる。背景事象のみが統計的にふらついてピークを作る確率はそれぞれ 6.5σ 、 7.4σ であり、これにより新粒子の発見を確立した。

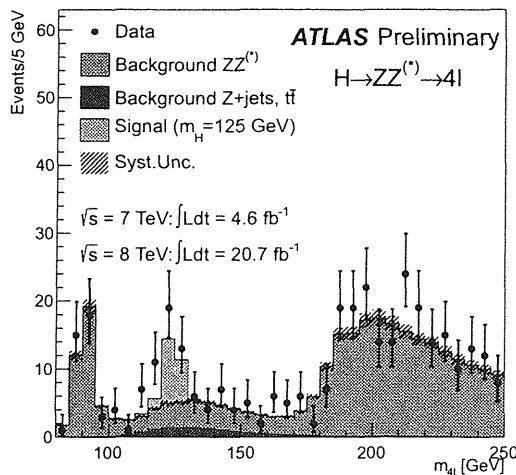


図 6: 4 レプトン終状態でのヒッグス粒子探索。横軸は 4 レプトンの不変質量。125 GeV/c^2 近辺を除き、ヒッグスを介さない ZZ 生成、Z と随伴生成されたジェットの誤認識やトップクォーク対の誤認識による背景事象によりデータを説明できる。

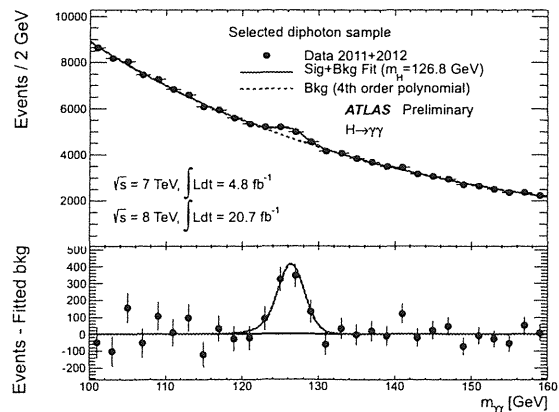


図 7: 2 光子終状態でのヒッグス粒子探索。横軸は 2 光子の不変質量。主な背景事象は QCD ジェットの誤認識によるものなので、分布は構造を持たないスムーズな曲線で表現できる。下図はスムーズな曲線からのずれの分布で $125 \text{ GeV}/c^2$ 近辺に超過が見られる。

図8は、新粒子の質量と生成断面積（標準模型ヒッグスの生成断面積で規格化）の測定値を2つの探索モード別および統合したものを示す。中心値にわずかなずれが見られるが、両者は $125.5 \text{ GeV}/c^2$ の統合値となる。

ヒッグス粒子の探索は様々な崩壊モードで行っている。図9は $H \rightarrow WW$, $H \rightarrow \tau\tau$, $H \rightarrow bb$ (W または Z を随伴) を含めた5モードでの生成断面積の測定結果を示す。前述2モードに加え $H \rightarrow WW$ の有意な信号が得られているが、残りの2モードでは統計誤差の範囲で信号の有無を判定できない。

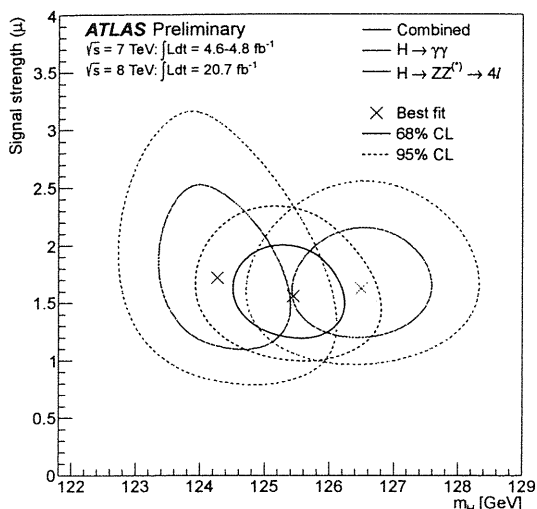


図8: $H \rightarrow ZZ$ および $H \rightarrow \gamma\gamma$ モードでのヒッグス質量と標準模型で規格化した生成断面積測定値の比較。各測定値には 1σ , 2σ の不確かさの領域が描かれている。

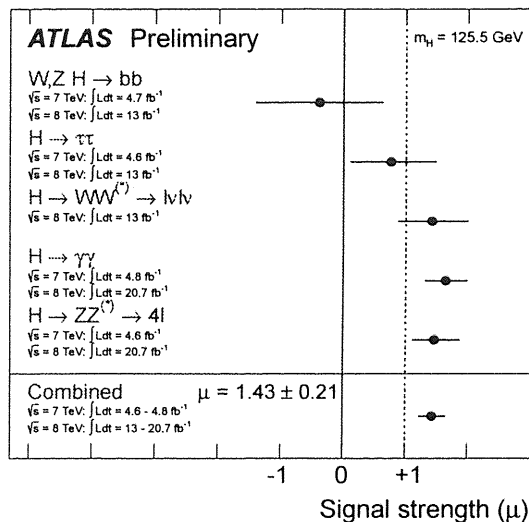


図9: 5つの崩壊モードでのヒッグス生成断面積測定のみとめ。横軸は標準模型で規格化した生成断面積で、1は標準模型と無矛盾、0は信号無しに対応する。

以上のデータ等より、ATLASとCMS実験グループは観測された新粒子がヒッグスの性質（スピン0、ゲージボソンに質量を与える）と無矛盾であると結論した。但し、標準模型ではヒッグス粒子はフェルミ粒子にも質量を与えるが、その観測の重要性は極めて高い。以下に τ 対に崩壊するモードの探索の現状を示す。

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。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り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。

最も感度の良い探索では、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10と図11はそのような事象選択後の $\tau\tau$ 系の不変質量分布を7 TeVと8 TeVの重心系エネルギーごとに示す。事象の多くは、 $Z \rightarrow \tau\tau$ で説明でき、 $125 \text{ GeV}/c^2$ の標準模型ヒッグスを仮定すると数イベントが観測されると予測されるが、現状で生成断面積の測定は限定的である。

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

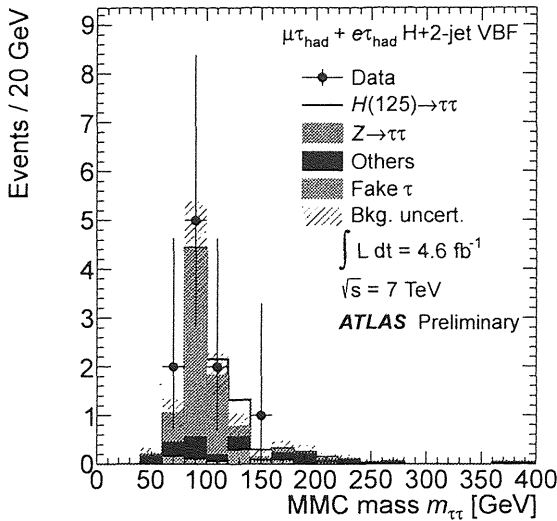


図 10: レプトン+ハドロン終状態での $qq \rightarrow qqH$ 検出に特化した信号選択をした事象の $\tau\tau$ 不変質量の分布. $125 \text{ GeV}/c^2$ ヒッグスと背景事象の予想分布と 7 TeV データとの比較.

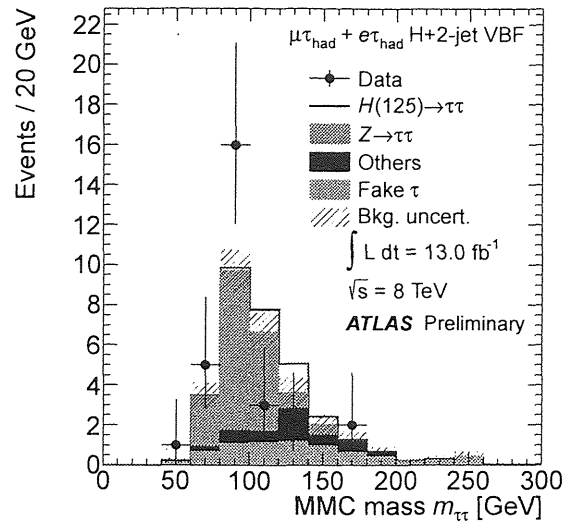


図 11: レプトン+ハドロン終状態での $qq \rightarrow qqH$ 検出に特化した信号選択をした事象の $\tau\tau$ 不変質量の分布. $125 \text{ GeV}/c^2$ ヒッグスと背景事象の予想分布と 8 TeV データとの比較.

崩壊 $H \rightarrow \tau\tau$ と $Z + H(\rightarrow bb)$ に注目した解析を継続している.

(2) 標準模型の物理

標準模型粒子の生成断面積測定は、標準模型の検証とともに新粒子探索における背景事象の理解のために重要である. 図 12 にいくつかの標準模型粒子の生成断面積を重心系 7 TeV と 8 TeV で測定し、理論計算との比較をしている. 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ソ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.

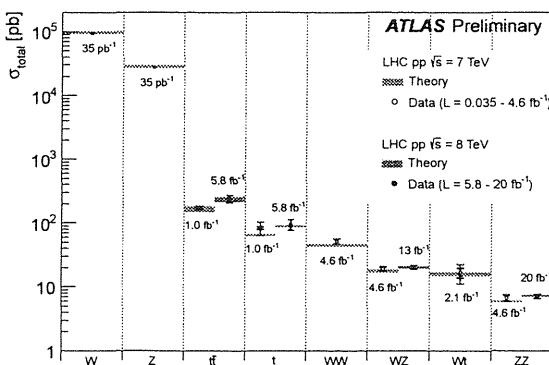


図 12: $\sqrt{s}=7 \text{ TeV}$ と 8 TeV でのいくつかの標準模型粒子生成断面積の測定値と理論予想値との比較.

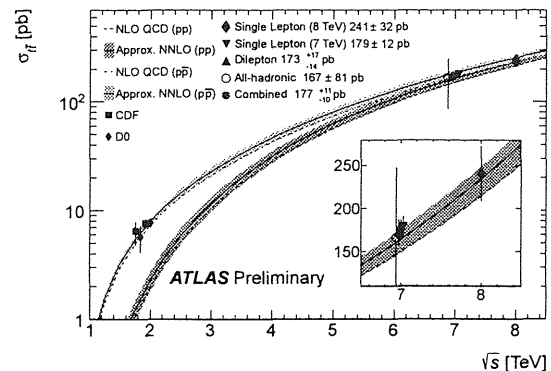


図 13: $t\bar{t}$ 生成断面積のエネルギー依存性の測定値と理論予想値との比較.

トップ対生成断面積については、終状態のモードによっていくつかの測定がなされている

が、いずれも 図 13 に示すように、理論予想と一致した。

(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が生成される期待がありその探索は重要である。

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。トップの超対称性パートナーであるストップは質量が最も軽いと考えられ、ハドロン衝突器では SUSY が存在するならば最初に発見できる SUSY 粒子と期待されている。図 14 はストップの探索結果であるが、8 TeV においても兆候が見られない。

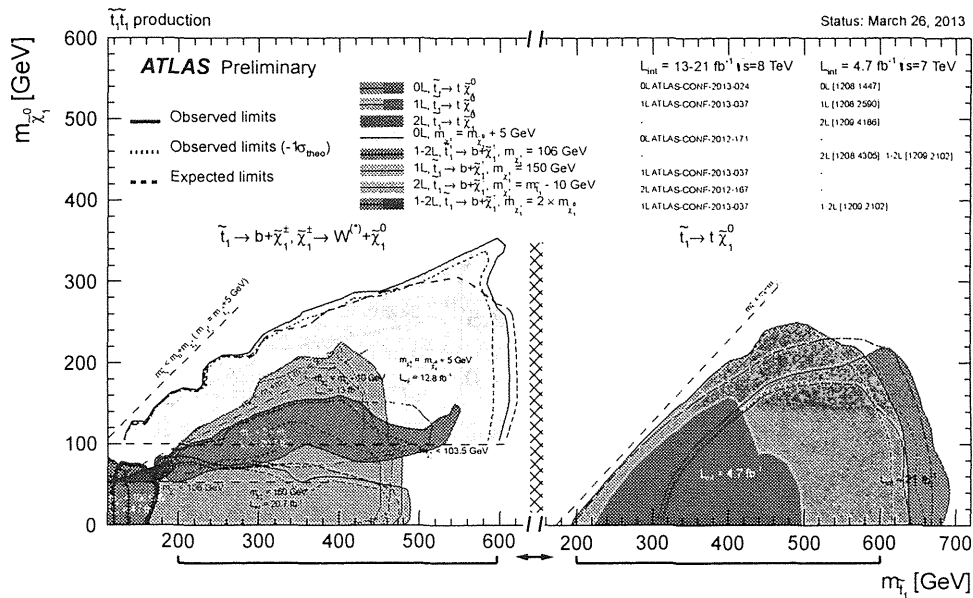


図 14: 95%信頼度での、ストップとニュートラルリーノ質量の棄却領域。(左) ストップがチャージノと b クォークに崩壊し、チャージノは W とニュートラルリーノに崩壊するモード (右) ストップがトップとニュートラルリーノに崩壊するモード。

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 1-4.7 TeV/c² までの質量を棄却した。その他、新しいゲージボソン、新しいクォーク、レプトクォーク、クォーク励起状態など、様々な探索を行ったが、標準模型を超える粒子は観測されていない。

重いこれらの粒子は、重心系エネルギーが高いほど生成されやすく、2015 以降の 14 TeV での探索によって発見されることも期待される。

(4) HL-LHC に用いる p 型シリコン検出器の開発

LHC は当初の設計エネルギー (14 TeV) と設計衝突輝度 (10³⁴ cm⁻² s⁻¹) を 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) 加速器に増強される。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 7 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、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_{eq}/cm^2) を受けても使用可能な設計を確立した。

現在は最終的な設計段階にあり、2012 年度は、加速器事故で一度に大量の粒子が入射された場合に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た。

(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する全く新しいタイプの検出器である。我々は 2005 年以來 Lapis セミコンダクター社の $0.20\mu m$ 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。

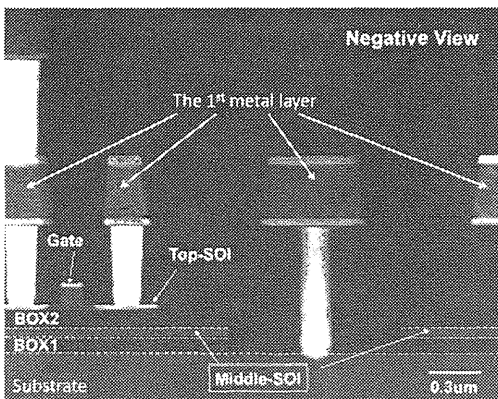


図 15: 新たに開発した 2 重 SOI 基板。FET 用 D-S 電極が BOX2 の上に形成され、最下部の基板に達するピクセル用電極がみられる。

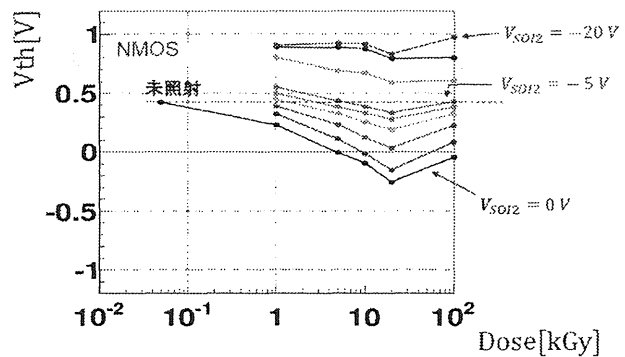


図 16: 2 重 SOI 基板上に形成した FET のしきい値電圧の線量依存性。中間シリコン層の電圧が 0 V のままでは NMOS のしきい値電圧は下がり負になるが、適切な電圧を加えることで補償可能で、どの線量でも初期のしきい値電圧に戻ることを示した。

昨年度までの研究開発で、高速な電荷収集が可能な全空乏化型ピクセル検出器を試作し、素粒子実験での衝突点近傍に設置するピクセル検出器として必要な多重散乱を抑えるために物質量を減らす薄型化の実現を行った。実際に荷電粒子の検出能力をテストビームで実証してきた。SOI はトランジスタ各素子が酸化膜で覆われているために、漏れ電流が少なく、Lapis の FD-SOI プロセスでは、高速応答、広範囲の温度領域でも使用できる特質があるため、さまざまな分野での応用が期待できる。しかし酸化膜は、一方、正孔を蓄積し、電離性放射線線量が増えると蓄積電荷の影響を受けて近傍にあるトランジスタの特性を変化させる

ことが分かっていた。高輝度のハドロン実験に適用するためには、この課題の解決が不可欠である。

今年度は、埋め込み酸化膜2層からなる2重SOI基板の製作に成功した。図15は新たに開発した基板のトランジスタを含む断面図である。粒子センサー部は最下部の基板であるが、その上に中間SOIシリコン層をはさんで2重の埋め込み酸化膜（BOX）が形成されている。BOX2の直上にあるトランジスタの性能はBOX2の帯電により影響を受けるが、中間シリコン層に電圧を加えることでその変化を補償できる。

実際に補償可能であることを確かめるために、いくつかのタイプのトランジスタにCo γ 線を照射して、トランジスタ特性の線量依存性を測定した。図16はNMOSトランジスタのしきい値電圧の変化を示したものであるが、線量とともにしきい値電圧は減少する。適切な電圧を中間シリコン層に加えることで、未照射の特性に回復できる。トランスコンダクタンス、スイングなどの特性も同様に補償できることを示した。

【3】 ミューオンラジオグラフィによる大規模構造体の内部構造透視

宇宙線 μ 粒子を使って、原子炉などの大規模構造体内部構造の透視の研究を行った。これは福島原子炉事故を受けて、高エネルギー加速器研究機構らと協力して、2011年秋から準備を始めたものである。2012年3月には1m \times 1mの有感面積をもつシンチレータ面（1cm幅のシンチレータバーを縦横に100本ずつ並べたもの）4セットからなる検出器を実際の原子炉に設置して実証実験を開始した。シンチレータ光を波長変換ファイバーで取り出しMPPCで読み出す方式は、本研究室が開発してきた技術であり、FPGAによる読み出し回路の構成など高エネルギー実験の技術を応用している。

炉心から64m離れた位置で測定を行い、7月末までは核燃料が装填される位置に、11月末までは燃料プールの位置に焦点をあてて宇宙線の分布を計数した。原子炉全体に対する宇宙線 μ 粒子数分布を図17に示す。原子炉構造を再現するGEANT4シミュレーションとの比較（図18）を通じて、測定全期間において、核燃料は装填されておらず、また、燃料格納プールに置かれた核燃料集合体の分布（図19）の推算を行った。現在は2つの検出器セットでの測定によりステレオ視の有効性を検証している。

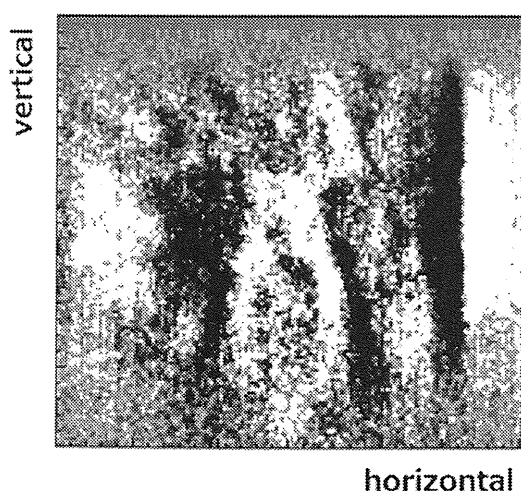


図17: 原子炉全体に対応する μ 粒子数分布。濃い領域は物質が多いために μ 粒子が吸収され分布が少ない。MARK-II型原子炉特有なコーン状の格納容器、その内側の円錐状の圧力容器が確認できる。測定期間100日のデータで、構造が見易いようにアクセプタンスなどの緩やかに変化する成分はフーリエ解析により除去してある。右端は建屋の壁。

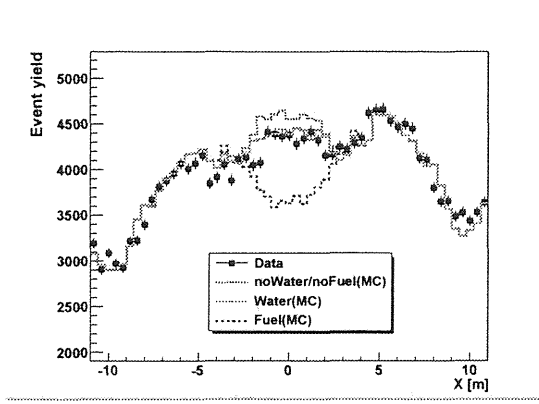


図 18: 核燃料を装填する位置での μ 粒子事象数分布のシミュレーションとの比較. 水相当の物質の予想と測定値が一致し, 測定期間中は燃料が装填されていないことを示した.

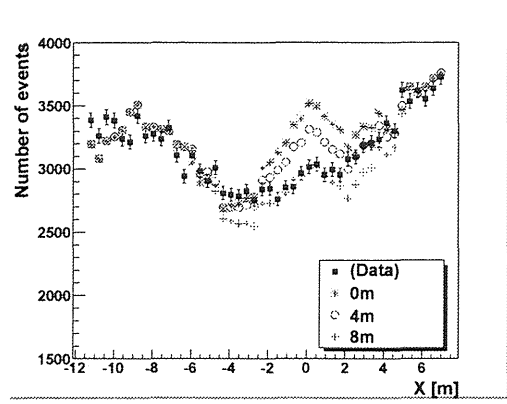


図 19: 燃料格納プール周辺の μ 粒子事象数分布のシミュレーションとの比較. シミュレーションでは燃料集合体の厚さを 0, 4, 8 m の 3 段階で示しているが, 幅 6 m に渡り約 6 m から 8 m の厚さで分布していると推算される.

【4】 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 500 GeV 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. 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. 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 計画は, 2012 年 7 月の LHC 実験によるヒッグス粒子と矛盾しない新粒子の発見, ならびに 2012 年 12 月の「国際リニアコライダー (ILC) 計画」の技術設計書の完成と, この年度に大きな進展を迎えた. 計画では, その第一期において, 重心系エネルギー 250 GeV からスタートし, 500 GeV まで増強する. そして, 第二期において重心系エネルギー 1 TeV までの加速器増強が想定されている.

ILC 実験では, ゲージボソンやトップクォーク, ヒッグス粒子などの崩壊により発生する多数のジェットのエネギーを精密に測定することが非常に重要となる. ジェットに対するエネルギー分解能は, $\sigma(E)/E = 0.3/\sqrt{E(\text{GeV})}$ が要求されており, この要求値を実現するため, 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.

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ダ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 20).

シンチレータ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上, 磁場中で使用されることもあり, 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, 現状では光センサーのほぼ唯一解である.

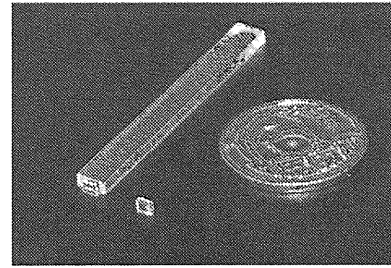
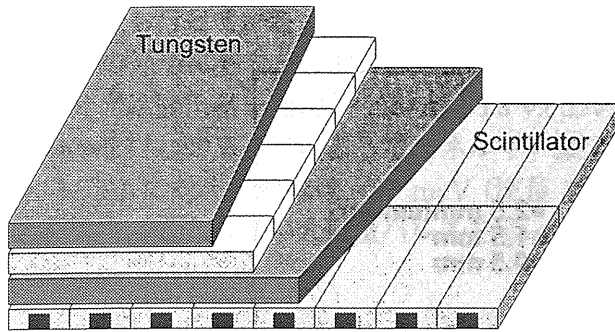


図 20: ILC(ILD) 検出器の電磁カロリメータ候補の一つ。カロリメータは、吸収体とシンチレータ層をもつサンプリングカロリメータとなっており、シンチレータ層は、シンチレータストリップ (43.5mm × 5mm × 2mm) を横方向と縦方向を交差させ並べた構造になっている。

我々は、これまで、様々な仕様の MPPC サンプルを用い、MPPC 単体、および実機に近づけた形として、シンチレータのストリップと 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。我々は、1600 ピクセルと 2500 ピクセルの MPPC の線形応答性を比較し、2500 ピクセルのものが入射光子数に対し実際により広い範囲で線形応答性に優れていることを確かめた。更に MPPC の応答回復時間は、ピクセルの静電容量とクエンチング抵抗で決まっていることを確認し、2500 ピクセルの MPPC は、より早い応答回復時間をもっていることが分かった。これは、シンチレータの発光時間構造を考慮すると、MPPC とシンチレータを組み合わせて使用したときにセンサーの線形応答性に対し、より有利に働くことを示唆している。また、カロリメータの分解能を決めるもうひとつの大きな要因は、シンチレータストリップ内の応答一様性である。我々は、これについても ^{90}Sr β 線源を用い、荷電粒子の MIP 通過に対する応答を MPPC とシンチレータの組み合わせを用いて実測した。(図 21)

シンチレータ内発光位置が MPPC 受光領域を見込む面積が大きく変化する MPPC 読み出し端周辺部を除き、シンチレータストリップの出力光電子数は、およそ 13 光電子数程度となることが分かった。今後は、このデータをもとにシミュレーションを行い、シンチレータストリップの形状、MPPC の仕様の最適化を図っていく。

【5】 超伝導体赤外線検出器の開発

過去 10 年間に超伝導トンネル接合素子 STJ (Superconducting Tunnel Junction) を用いた光検出器の開発研究が世界でひろく行われてきた。これは超伝導体が半導体と比較してはるかに小さいエネルギーバンドギャップを有することを利用して、半導体検出器などの既存の光検出器に比べてエネルギー分解能がはるかに高い光検出器を原理的に実現できることが強い動機となっている。このことから、高エネルギー分解能の X 線検出器や赤外線検出器への応用を目指して開発が進められてきた。

本開発研究では、ニュートリノ崩壊探索実験に用いることを目標として従来用いられている Nb (超伝導ギャップエネルギー $\Delta=1.55\text{meV}$, $T_c = 9.23\text{ K}$) を用いた Nb/Al-STJ やさら

Uniformity

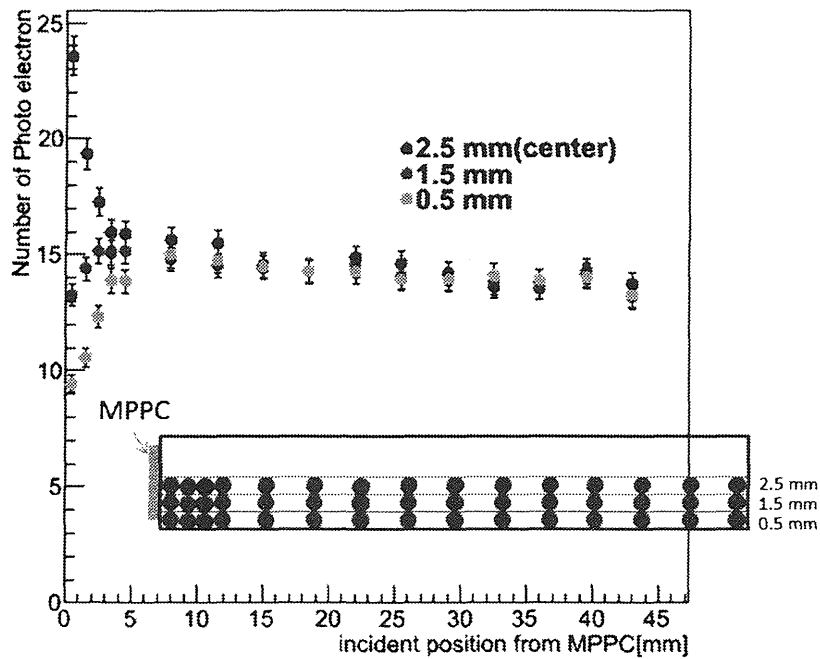


図 21: シンチレータ (43.5mm × 5mm × 2mm) + MPPC (有効受光面積 1mm × 1mm) の出力光電子数の荷電粒子 MIP 通過位置依存性

に Δ の小さい Hf ($\Delta=0.020$ 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検出器 (STJ) の開発を目指している。

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, ν_1) 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結合の 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、 $110/\text{cm}^3/\text{世代}$ 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 ~ 25 meV とすると背景雑音となる赤外線背景放射の光子のエネルギースペクトルに対し、ニュートリノ崩壊の信号はそのエネルギーを上限として低エネルギー側だけに裾を引くスペクトル分布として観測される。この信号の検出に必要な検出器に対する要求は、宇宙背景ニュートリノの輻射崩壊のシミュレーションを行った結果、25 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。

我々は、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い、2010 年度には、Hf-HfO_x-Hf による SIS 構造の作成に成功し、ジョセフソン電流を確認した。リーク電流が大きいため目標とする検出器として動作させるには、更に改善の必要があるが、可視光に対する光応答のテストを開始した。(図 22 (左))

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 のギャップエネルギーを考慮すると、我々が目標としている 25 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、25 meV (波長 50 μm) の一光子を検出することであるが、現在は可視光、近赤外光の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 22 (右))

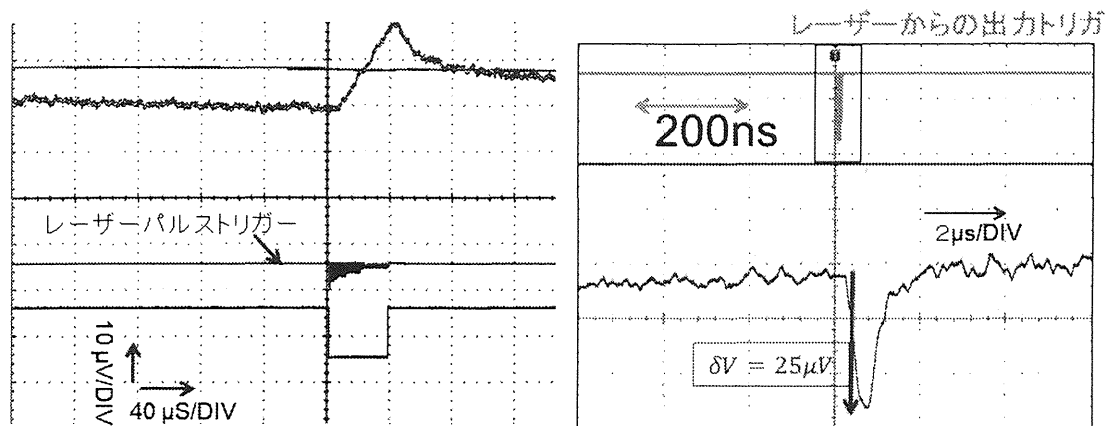


図 22: 可視光 (波長 470 nm) の大光量レーザ光パルスに対する Hf-STJ の信号出力 (左図). 近赤外光 (波長 1310 nm) の大光量レーザ光パルスに対する Nb/Al-STJ の信号出力 (左図).

図 22 右は、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、低ノイズ、極低温読み出し回路の開発を進めている。

【6】 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：15,000 千円, 旅費：5,000 千円
2. 日米科学技術協力事業「ニュートリノ崩壊探索」
共同研究 (日本側参加機関：筑波大物理, 宇宙航空研究開発機構, 高エネルギー加速器研究機構, 岡山大理, 理化学研究所, 福井大工, 近畿大理工. 日本側研究代表者：金 信弘)
物件費：5,000 千円, 旅費：1,500 千円
3. KEK 大学等連携支援事業「筑波大ー KEK 連携を核としたつくば教育研究拠点の構築に向けて」
共同代表者：守友 浩, 金 信弘, 末木啓介
物件費：12,000 千円 (うち素粒子実験分：4,000 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) 780 千円 (直接経費 600 千円, 間接経費 180 千円)
5. 科学研究費補助金 新学術領域研究 (研究領域提案型)
研究課題：「ヒッグス粒子の発見による素粒子の質量起源の解明」
研究分担者：受川 史彦
13,000 千円 (直接経費：10,000 千円, 間接経費：3,000 千円)
6. 科学研究費補助金 基盤研究 A：「SOI 技術による高レート実験用薄型ピクセル検出器の研究」
研究分担者：原 和彦
(直接経費：300 千円, 間接経費：90 千円)

【7】 研究発表

(1) 学会誌等への発表論文

1. “Search for a heavy vector boson decaying to two gluons in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **86**, 112002 (2012).
2. “Measurements of the Top-quark Mass and the $t\bar{t}$ Cross Section in the Hadronic $\tau+$ Jets Decay Channel at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **109**, 192001 (2012).
3. “Measurement of the Bottom-Strange Meson Mixing Phase in the Full CDF Data Set,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **109**, 171802 (2012).

4. “Search for the standard model Higgs boson produced in association with top quarks using the full CDF data set,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **109**, 181802 (2012).
5. “Transverse momentum cross section of e^+e^- pairs in the Z -boson region from $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **86**, 052010 (2012).
6. “Precision Top-Quark Mass Measurements at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **109**, 152003 (2012).
7. “Evidence for a particle produced in association with weak bosons and decaying to a bottom-antibottom quark pair in Higgs boson searches at the Tevatron,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF and D0 Collaborations], Phys. Rev. Lett. **109**, 071804 (2012).
8. “Search for a Higgs boson in the diphoton final state using the full CDF data set from proton-antiproton collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Lett. B **717**, 173 (2012).
9. “Novel inclusive search for the Higgs boson in the four-lepton final state at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **86**, 072012 (2012).
10. “Search for Neutral Higgs Bosons in Events with Multiple Bottom Quarks at the Tevatron,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF and D0 Collaborations], Phys. Rev. D **86**, 091101 (2012).
11. “Measurement of the difference of CP-violating asymmetries in $D^0 \rightarrow K^+K^-$ and $D^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ decays at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **109**, 111801 (2012).
12. “Search for the standard model Higgs boson decaying to a $b\bar{b}$ pair in events with no charged leptons and large missing transverse energy using the full CDF data set,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **109**, 111805 (2012).
13. “Combined search for the standard model Higgs boson decaying to a bb pair using the full CDF data set,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **109**, 111802 (2012).
14. “Search for the standard model Higgs boson decaying to a bb pair in events with two oppositely-charged leptons using the full CDF data set,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **109**, 111803 (2012).
15. “Search for the standard model Higgs boson decaying to a bb pair in events with one charged lepton and large missing transverse energy using the full CDF data set,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **109**, 111804 (2012).
16. “Combination of the top-quark mass measurements from the Tevatron collider,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF and D0 Collaborations], Phys. Rev. D **86**, 092003 (2012).
17. “Measurement of CP-violation asymmetries in $D^0 \rightarrow K_S\pi^+\pi^-$,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **86**, 032007 (2012).
18. “Search for the standard model Higgs boson produced in association with a W^\pm boson with 7.5 fb^{-1} integrated luminosity at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **86**, 032011 (2012).
19. “Diffractive Dijet Production in $\bar{p}p$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **86**, 032009 (2012).
20. “Measurement of $B_s^0 \rightarrow D_s^{(*)+}D_s^{(*)-}$ Branching Ratios,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **108**, 201801 (2012).
21. “Search for the standard model Higgs boson produced in association with a Z Boson in 7.9 fb^{-1} of p anti- p collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Lett. B **715**, 98 (2012).

22. “Search for Scalar Top Quark Production in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], JHEP **1210**, 158 (2012).
23. “Search for a heavy particle decaying to a top quark and a light quark in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **108**, 211805 (2012).
24. “A Search for dark matter in events with one jet and missing transverse energy in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **108**, 211804 (2012).
25. “Precise measurement of the W -boson mass with the CDF II detector,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **108**, 151803 (2012).
26. “Measurement of the WZ Cross Section and Triple Gauge Couplings in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **86**, 031104 (2012).
27. “Search for a dark matter candidate produced in association with a single top quark in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **108**, 201802 (2012).
28. “Combination of CDF and D0 measurements of the W boson helicity in top quark decays,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF and D0 Collaborations], Phys. Rev. D **85**, 071106 (2012).
29. “Search for anomalous production of multiple leptons in association with W and Z bosons at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **85**, 092001 (2012).
30. “Search for a low mass Standard Model Higgs boson in the $\tau-\tau$ decay channel in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **108**, 181804 (2012).
31. “Measurement of the Top Quark Mass in the All-Hadronic Mode at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Lett. B **714**, 24 (2012).
32. “Search for Standard Model Higgs Boson Production in Association with a W Boson Using a Matrix Element Technique at CDF in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **85**, 072001 (2012).
33. “Measurement of the branching fraction $\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+ \pi^- \pi^+ \pi^-)$ at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **85**, 032003 (2012).
34. “Measurement of the masses and widths of the bottom baryons Σ_b^{+-} and Σ_b^{*+-} ,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **85**, 092011 (2012).
35. “Measurement of ZZ production in leptonic final states at \sqrt{s} of 1.96 TeV at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **108**, 101801 (2012).
36. “Search for Standard Model Higgs Boson Production in Association with a W Boson at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **85**, 052002 (2012).
37. “Measurement of the CP-Violating Phase $\beta_s^{J/\Psi\phi}$ in $B_s^0 \rightarrow J/\Psi\phi$ Decays with the CDF II Detector,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **85**, 072002 (2012).
38. “Measurements of Angular Distributions of Muons From Υ Meson Decays in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **108**, 151802 (2012).
39. “Search for new phenomena in events with two Z bosons and missing transverse momentum in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **85**, 011104 (2012).

40. “Observation of Exclusive Gamma Gamma Production in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **108**, 081801 (2012).
41. “Measurement of CP-violating asymmetries in $D^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ and $D^0 \rightarrow K^+K^-$ decays at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **85**, 012009 (2012).
42. “An additional study of multi-muon events produced in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Lett. B **710**, 278 (2012).
43. “Search for high-mass resonances decaying into ZZ in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **85**, 012008 (2012).
44. “Evidence for the charmless annihilation decay mode $B_s^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **108**, 211803 (2012).
45. “Search for a Higgs Boson in the Diphoton Final State in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **108**, 011801 (2012).
46. “Search for heavy metastable particles decaying to jet pairs in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **85**, 012007 (2012).
47. “Search for $WZ + ZZ$ production with MET + jets with b enhancement at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **85**, 012002 (2012).
48. “Measurements of the Angular Distributions in the Decays $B \rightarrow K^{(*)}\mu^+\mu^-$ at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **108**, 081807 (2012).
49. “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], Phys. Rev. D **85**, 091101 (2012).
50. “Search for Higgs Bosons Produced in Association with b -quarks,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **85**, 032005 (2012).
51. “Search for the Rare Radiative Decay: $W \rightarrow \pi\gamma$ in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **85**, 032001 (2012).
52. “Production of Λ , $\bar{\Lambda}^0$, Ξ^\pm and Ω^\pm Hyperons in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **86**, 012002 (2012).
53. “Multi-channel search for squarks and gluinos in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions 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. **C73** 2362 (2013).
54. “A Search for Prompt Lepton-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. **B719** 299 (2013).
55. “Search for charged Higgs bosons through the violation of lepton universality in $t\bar{t}$ events using pp collision data at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS experiment”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, JHEP **03** 076 (2013).
56. “Measurement of the $t\bar{t}$ production cross section in the τ +jets channel using the ATLAS detector”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Eur. Phys. J. **C73** 2328 (2013).
57. “Measurement of Υ production in 7 TeV pp collisions at ATLAS”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Rev. D **87** 052004 (2013).

58. “Search for the neutral Higgs bosons of the Minimal Supersymmetric Standard Model 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 **02** 095 (2013).
59. “Measurement of angular correlations in Drell-Yan lepton pairs to probe Z/γ^* boson transverse momentum 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. **B720** 32 (2013).
60. “Search for new phenomena in events with three charged leptons 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 87** 052002 (2013).
61. “Measurement of ZZ production in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV and limits on anomalous ZZZ and ZZ γ couplings with the ATLAS detector”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
JHEP **03** 128 (2013).
62. “Search for resonances decaying into top-quark pairs using fully hadronic decays in pp collisions with ATLAS at $\sqrt{s} = 7$ TeV”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
JHEP **03** 116 (2013).
63. “Measurement of isolated-photon pair production 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 **03** 086 (2013).
64. “Searches for heavy long-lived sleptons and R-hadrons 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.*,
Phys. Lett. **B720** 277 (2013).
65. “Search for contact interactions and large extra dimensions in dilepton events 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. **D87** 015010 (2013).
66. “Search for supersymmetry in events with photons, bottom quarks, and missing transverse momentum in proton-proton collisions at a centre-of-mass energy of 7 TeV with the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B719** 261 (2013).
67. “Search for long-lived, heavy particles in final states with a muon and multi-track displaced vertex 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. **B719** 280 (2013).
68. “A Massive Particle Consistent with the Standard Model Higgs Boson observed with the ATLAS Detector at the Large Hadron Collider”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Science **338** 6114, 1576.
69. “A search for high-mass resonances decaying to $\tau u^+ \tau^-$ 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. **B719** 242 (2013).

70. “Measurement of Z boson production in Pb+Pb 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. Rev. Lett. **110** 022301 (2013).
71. “Jet energy resolution in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV recorded in 2010 with the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Eur. Phys. J. **C73** 2306 (2013).
72. “Search for pair production of a heavy top-like quarks decaying to a high- p_T W boson and a b quark in the lepton plus jets final state 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. **B718** 1284 (2013).
73. “Search for doubly-charged Higgs bosons in like-sign dilepton final states 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. **C72** 2244 (2012).
74. “Search for anomalous production of prompt like-sign lepton pairs 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 **12** 007 (2012).
75. “Search for pair-produced massive coloured scalars in four-jet final states with the ATLAS detector in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Eur. Phys. J. **C73** 2263 (2012).
76. “Search for pair production of massive particles decaying into three quarks 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.*,
JHEP **12** 086 (2012).
77. “Search for dark matter and large extra dimensions in events with a jet and missing transverse momentum with the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
JHEP **12** 075 (2012).
78. “Search for R-parity-violating supersymmetry in events with four or more leptons in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions with the ATLAS detector”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
JHEP **12** 124 (2012).
79. “Search for direct chargino production in anomaly-mediated supersymmetry breaking models based on a disappearing-track signature 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 **01** 131 (2013).
80. “ATLAS search for new phenomena in dijet mass and angular distributions using pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
JHEP **01** 029 (2013).
81. “Search for Supersymmetry in Events with Large Missing Transverse Momentum, Jets, and at Least One Tau Lepton in 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. **C72** 2215 (2012).

82. “Measurement of the flavour composition of dijet events 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. **C72** 2301 (2012).
83. “Search for Displaced Muonic Lepton Jets from light Higgs boson decay 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. **B721** 32 (2013).
84. “Search for top-jet resonances in the lepton+jets channel of $t\bar{t}$ + jets events with the ATLAS detector in 4.7 fb^{-1} of pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Rev. **D86** 091103 (2012).
85. “ATLAS search for a heavy gauge boson decaying to a charged lepton and a neutrino 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** 2241 (2012).
86. “Search for dark matter candidates and large extra dimensions in events with a photon and missing transverse momentum in pp collision data 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. **110** 011802 (2013).
87. “Search for a heavy top-quark partner in final states with two leptons with the ATLAS detector at the LHC ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
JHEP **11** 094 (2012).
88. “Search for high-mass resonances decaying to dilepton final states 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 **11** 138 (2012).
89. “Search for light top squark pair production in final states with leptons and b-jets 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. **B720** 13 (2013).
90. “Search for Diphoton Events with Large Missing Transverse Momentum in 5 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. **B718** 411 (2013).
91. “Measurements of the pseudorapidity dependence of the total transverse energy in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with ATLAS ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
JHEP **11** 033 (2012).
92. “Further search for supersymmetry at $\sqrt{s} = 7$ TeV in final states with jets, missing transverse momentum and isolated leptons with the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Rev. **86** 092002 (2012).
93. “Search for light scalar top quark pair production in final states with two leptons 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.*,
Eur. Phys. J. **C72** 2237 (2012).

94. “Search for direct production of charginos and neutralinos in events with three leptons and missing transverse momentum in $\sqrt{s}= 7$ TeV pp collisions with the ATLAS detector”, ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Lett. **B718** 841 (2013).
95. “Search for new phenomena in the WW to $\ell\nu\ell'\nu'$ final state 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. **B718** 860 (2012).
96. “Search for direct slepton and gaugino production in final states with two leptons and missing transverse momentum 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.*, Phys. Lett. **B718** 879 (2012).
97. “Search for direct top squark pair production in final states with one isolated lepton, jets, and missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions using 4.7 fb^{-1} of ATLAS data ”, ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **109** 211803 (2012).
98. “Measurement of the Jet Size Dependence of Inclusive Jet Suppression 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. **B719** 220 (2013).
99. “Measurement of WZ Production 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.*, Eur. Phys. J. **C72** 2173 (2012).
100. “Search for a supersymmetric partner to the top quark in final states with jets and missing transverse momentum 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. **109** 211802 (2012).
101. “Search for squarks and gluinos with the ATLAS detector in final states with jets and missing transverse momentum using 4.7 fb^{-1} of $\sqrt{s} = 7$ TeV proton-proton collision data”, ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Rev. **D87** 012008 (2013).
102. “Time dependent angular analysis of the decay $B_s \rightarrow J/\psi\phi$ and extraction of $\Delta\Gamma_s$ and the CP-violating weak phase ϕ_s by ATLAS”, ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, JHEP **12** 072 (2012).
103. “ Underlying event characteristics and their dependence on jet size of charged-particle jet events 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. **D86** 072004 (2012).
104. “Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC ”, ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Lett. **B716** 1 (2012).
105. “Search for magnetic monopoles in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions with the ATLAS detector ”, ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **109** 261803 (2012).
106. “Measurements of top quark pair relative differential cross-sections 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. **C73** 2261 (2013).

107. “Search for top and bottom squarks from gluino pair production in final states with missing transverse energy and at least three b-jets with the ATLAS detector”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Eur. Phys. J. **C72** 2174 (2012).
108. “A search for $t\bar{t}$ resonances in lepton+jets events with highly boosted top quarks collected 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 **09** 041 (2012).
109. “Measurement of the Λ_b lifetime and mass in the ATLAS experiment”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Rev. **D 87** 032002 (2013).
110. “Combined search for the Standard Model Higgs boson 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. **D86** 032003 (2012).
111. “Search for the Standard Model Higgs boson produced in association with a vector boson and decaying to a b-quark pair with the ATLAS detector”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B718** 369 (2012).
112. “Search for the Higgs boson in the $H \rightarrow WW \rightarrow \ell\nu jj$ decay channel 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. **B718** 391 (2012).
113. “Search for the Standard Model Higgs boson in the H to $\tau^+\tau^-$ decay mode in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions with ATLAS”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
JHEP **09** 070 (2012).
114. “ATLAS measurements of the properties of jets for boosted particle searches”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Rev. **D 86** 072006 (2012).
115. “Search for a Standard Model Higgs in the mass range 200-600 GeV in the channel $H \rightarrow ZZ \rightarrow \ell\ell qq$ with with the ATLAS detector”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B717** 70 (2012).
116. “Measurement of the b-hadron production cross section using decays to $D^*\mu X$ final states 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.*,
Nucl. Phys. **B 864** 341 (2012).
117. “Measurement of event shapes at large momentum transfer 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** 2211 (2012).
118. “Hunt for new phenomena using large jet multiplicities and missing transverse momentum with ATLAS in 4.7fb^{-1} of $\sqrt{s} = 7$ TeV proton-proton collisions”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
JHEP **07** 167 (2012).
119. “Search for the Standard Model Higgs boson in the $H \rightarrow WW \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ decay mode with 4.7fb^{-1} of ATLAS data at $\sqrt{s} = 7$ TeV”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B716** 62 (2012).

120. “A search for flavour changing neutral currents in top-quark decays in pp collision data collected with the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 7$ TeV ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
JHEP **09** 139 (2012).
121. “Search for a Standard Model Higgs boson in the $H \rightarrow ZZ \rightarrow \ell\ell\nu\nu$ decay channel using 4.7 fb^{-1} of $\sqrt{s} = 7$ TeV data with the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B717** 29 (2012).
122. “Evidence for the associated production of a W boson and a top quark in ATLAS at $\sqrt{s} = 7$ TeV ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B716** 142 (2012).
123. “A search for $t\bar{t}$ resonances with the ATLAS detector in 2.05 fb^{-1} of proton-proton 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** 2083 (2012).
124. “Measurement of the t-channel single top-quark production 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. Lett. **B717** 330 (2012).
125. “Measurement of W γ and Z γ production cross sections in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV and limits on anomalous triple gauge couplings with the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B717** 49 (2012).
126. “Measurement of W boson polarization in top quark decays with the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
JHEP **06** 088 (2012).
127. “Measurement of the top quark pair cross section with ATLAS in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using final states with an electron or a muon and a hadronically decaying tau lepton ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B717** 89 (2012).
128. “Search for $t\bar{b}$ resonances 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. **109** 081801 (2012).
129. “Search for a fermiophobic Higgs boson in the diphoton decay channel with the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Eur. Phys. J. **C72** 2157 (2012).
130. “Search for Lepton Flavour Violation in the $e\mu$ Continuum 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.*,
Eur. Phys. J. **C72** 2040 (2012).
131. “Measurement of tau polarization in $W \rightarrow \tau\nu$ decays 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** 2062 (2012).
132. “Search for Scalar Top Quark Pair Production in Natural Gauge Mediated Supersymmetry Models 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.*,
Phys. Lett. **B715** 44 (2012).

133. “Search for supersymmetry in events with three leptons and missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions with the ATLAS detector”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Rev. Lett. **108** 261804 (2012).
134. “Search for TeV-scale Gravity Signatures in Final States with Leptons and Jets with the ATLAS Detector at $\sqrt{s} = 7$ TeV”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B716** 122 (2012).
135. “Search for supersymmetry with jets, missing transverse momentum and at least one hadronically decaying tau lepton 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. **B714** 194 (2012).
136. “Search for charged Higgs bosons decaying via $H^+ \rightarrow \tau + \nu$ in $t\bar{t}$ events using 4.6 fb^{-1} of pp collision data 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 **06** 039 (2012).
137. “Search for resonant WZ production in the WZ to $\ell\nu\ell'\ell'$ channel in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions with the ATLAS detector”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Rev. **D85** 112012 (2012).
138. “Search for pair production of a new quark that decays to a Z boson and a bottom quark with the ATLAS detector”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Rev. Lett. **109** 071801 (2012).
139. “Search for the decay $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ with the ATLAS detector”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B713** 387 (2012).
140. “Search for Events with Large Missing Transverse Momentum, Jets, and at Least Two Tau Leptons in 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. **B713** 180 (2012).
141. “Measurement of the WW cross section in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions at ATLAS and limits on anomalous gauge couplings”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B712** 289 (2012).
142. “Search for supersymmetry in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV in final states with missing transverse momentum and b-jets with the ATLAS detector”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Rev. **D85** 112006 (2012).
143. “Search for gluinos in events with two same-sign leptons, jets and missing transverse momentum 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.*,
Phys. Rev. Lett. **108** 241802 (2012).
144. “Measurement of the Top Quark Mass with the Template Method in the $t\bar{t} \rightarrow$ lepton+jets Channel using ATLAS Data”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Eur. Phys. J. **C72** 2046 (2012).
145. “Search for heavy neutrinos and right-handed W bosons in events with two leptons and 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. **C72** 2056 (2012).

146. “Measurement of $t\bar{t}$ 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.*,
Eur. Phys. J. **C72** 2043 (2012).
147. “Jet mass and substructure of inclusive jets in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions with the ATLAS experiment”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
JHEP **05** 128 (2012).
148. “Determination of the strange quark density of the proton from ATLAS data on $W \rightarrow l\nu$ and $Z \rightarrow \ell\ell$ cross-sections”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Rev. Lett. **109** 012001 (2012).
149. “Observation of spin correlation in $t\bar{t}$ events from 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. Rev. Lett. **108** 212001 (2012).
150. “Measurement of the charge asymmetry in top quark pair production 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.*,
Eur. Phys. J. **C72** 2039 (2012).
151. “Measurement of inclusive two-particle angular correlations in pp collisions 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. **C72** 157 (2012).
152. “Measurement of the azimuthal anisotropy for charged particle production in $\sqrt{s}_{NN} = 2.76$ TeV lead-lead collisions with the ATLAS detector”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Rev. **C86** 014907 (2012).
153. “Search for second 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.*,
Eur. Phys. J. **C72** 2151 (2012).
154. “Forward-backward correlations and charged-particle azimuthal distributions in pp interactions using the ATLAS detector”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
JHEP **07** 019 (2012).
155. “Measurement of the production cross section of an isolated photon associated with jets 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. **D85** 092014 (2012).
156. “Measurement of the polarisation of W bosons produced at large momentum transfer in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS experiment at the LHC”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Eur. Phys. J. **C72** 2001 (2012).
157. “Search for a light Higgs boson decaying to long-lived weakly-interacting particles 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** 251801 (2012).
158. “Single hadron response measurement and calorimeter jet energy scale uncertainty 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. **C73** 2305 (2012).

159. “Search for new particles decaying to ZZ using final states with leptons and jets 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. **B712** 331 (2012).
160. “Measurement of the azimuthal ordering of charged hadrons with the ATLAS detector”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Rev. **D86** 052005 (2012).
161. “Search for FCNC single top-quark production 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. **B712** 351 (2012).
162. “Search for down-type fourth generation quarks with the ATLAS Detector in events with one lepton and hadronically decaying W bosons”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Rev. Lett. **109** 032001 (2012).
163. “Measurement of the cross section for top-quark pair production in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector using final states with two high-pT leptons”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
JHEP **05** 059 (2012).
164. “Search for anomaly-mediated supersymmetry breaking with the ATLAS detector based on a disappearing-track signature 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** 1993 (2012).
165. “Search for pair-produced heavy quarks decaying to Wq in the two-lepton channel at ATLAS at $\sqrt{s} = 7$ TeV”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Rev. **D86** 012007 (2012).
166. “Search for Pair Production of a Heavy Up-Type Quark Decaying to a W Boson and a b Quark in the Lepton+Jets Channel with the ATLAS Detector”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Rev. Lett. **108** 261802 (2012).
167. “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.*,
Phys. Rev. Lett. **108** 111803 (2012).
168. “Search for Contact Interactions in Dilepton Events 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. Lett. **B712** 40 (2012).
169. “Search for decays of stopped, long-lived particles from 7 TeV pp collisions with the ATLAS detector”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Eur. Phys. J. **C72** 1965 (2012).
170. “Search for excited leptons 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. **D85** 072003 (2012).
171. “Measurement of the top quark pair production cross-section with ATLAS in the single lepton channel”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B711** 244 (2012).

172. “Study of jets produced in association with a W boson 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. **D85** 092004 (2012).
173. “Measurement of inclusive jet and dijet production 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.*,
Phys. Rev. **D86** 014022 (2012).
174. “Jet energy measurement with the ATLAS detector in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Eur. Phys. J. **C73** 2304 (2012).
175. “Search for Production of Resonant States in the Photon-Jet Mass Distribution using pp Collisions 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. Rev. Lett. **108** 211802 (2012).
176. “Measurement of the inclusive W^{+-} and Z/γ cross sections in the electron and muon decay channels 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. **D85** 072004 (2012).
177. “Evaluation of slim-edge, multi-guard, and punch-through-protection structures before and after proton irradiation”, S. Mitsui, K. Hara *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A699 (2013)36.
178. “Development of novel n+-in-p silicon planar pixel sensors for HL-LHC”, Y. Unno, K. Hara *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A699 (2013)72.
179. “Evaluation of novel KEK/HPK n-in-p pixel sensors for ATLAS upgrade with testbeam”, R. Nagai, K. Hara *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A699 (2013)78.
180. “Development of a silicon-microstrip super module prototype for the high luminosity LHC”, A. Clark *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A699 (2013)97.
181. “Electrical performance of a silicon micro-strip super-module prototype for the High-Luminosity LHC collider”, S. Gonzalez-Sevilla, K. Hara *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A699 (2013) 102.
182. 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. 倉田 正和: “DLM を用いた WH チャンネルで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 2012 (2012年7月6日-8日), 奈良県吉野郡吉野町.
2. 佐藤 構二: “ W ボソン対に崩壊する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 2012 (2012年7月6日-8日), 奈良県吉野郡吉野町.
3. 武内 勇司: “トップ対生成におけるスピン相関と前後方非対称性,”
科研費特定領域研究「フレーバー物理の新展開」研究会 2012 (2012年7月6日-8日), 奈良県吉野郡吉野町.
4. 金 信弘: “CDF 実験のフレーバー物理,”
科研費特定領域研究「フレーバー物理の新展開」研究会 2012 (2012年7月6日-8日), 奈良県吉野郡吉野町.

5. 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 III,”
日本物理学会 2012 年秋季大会 (2012 年 9 月 11 日-14 日), 京都産業大学.
6. 倉田 正和: “CDF 実験における Dynamical Likelihood Method を用いた標準理論ヒッグス粒子の探索,”
日本物理学会 2012 年秋季大会 (2012 年 9 月 11 日-14 日), 京都産業大学.
7. 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探索
日本物理学会 2012 年秋大会 (2012 年 9 月 11 日-14 日), 京都産業大学.
8. 林隆康: LHC-ATLAS 実験における W ボソンを伴うジェット生成事象の断面積測定
日本物理学会 2012 年秋大会 (2012 年 9 月 11 日-14 日), 京都産業大学.
9. 埴慶太: LHC-ATLAS 実験における $H \rightarrow \tau\tau \rightarrow \text{lepton} + \text{hadron}$ 崩壊チャンネルを用いたヒッグス粒子探索
日本物理学会 第 68 回年次大会 (2013 年 3 月 26 日-29 日), 広島大学.
10. 木内健司: LHC-ATLAS 実験における $ZH \rightarrow \nu\bar{\nu}bb$ 過程を用いたヒッグス粒子探索のための信号/背景選択最適化
日本物理学会 第 68 回年次大会 (2013 年 3 月 26 日-29 日), 広島大学.
11. 林隆康: LHC-ATLAS 実験における W ボソンを伴うジェット生成事象の断面積測定
日本物理学会 第 68 回年次大会 (2013 年 3 月 26 日-29 日), 広島大学.
12. 伊藤史哲: 宇宙線ミュオン・ラジオグラフィック・システムを用いた原子炉内構造の測定
日本物理学会 第 68 回年次大会 (2013 年 3 月 26 日-29 日), 広島大学.
13. 本多俊介: 2 層埋込酸化膜構造をもつ SOI ピクセル検出器の TID 放射線耐性の評価
日本物理学会 第 68 回年次大会 (2013 年 3 月 26 日-29 日), 広島大学.
14. 伊藤史哲: 宇宙線ミュオン・ラジオグラフィック・システムを用いた原子炉内構造の測定
SAT テクノロジーショーケース (2013 年 1 月 22 日), つくば市.
15. 武内勇司: ニュートリノ崩壊の探索のための検出器開発 (Hf-STJ 他),
KEK 測定器開発室月例会議 SDC 重点レビュー (2012 年 4 月 17 日), 高エネルギー加速器研究機構
16. 金信弘: Search for Neutrino Decay,
日米合同委員会 (2012 年 4 月 18 日), 湘南国際村センター
17. 笠原宏太: ニュートリノ崩壊からの遠赤外光探索のための Nb/Al-STJ の研究開発,
日本物理学会第 68 回年次大会 (2013 年 3 月 26 日-29 日), 広島大学東広島キャンパス
18. 永田和樹: ニュートリノ崩壊光探索のための Hf 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 68 回年次大会 (2013 年 3 月 26 日-29 日), 広島大学東広島キャンパス
19. 笠原宏太: SOI 基板上への STJ の形成「SOI-STJ」,
LAPIS meeting(2013 年 1 月 30 日), ラピスセミコンダクター横浜テクノロジーセンター
20. 金井伸也, 永田和樹, 笠原宏太, 奥平琢也: ニュートリノ崩壊探索に用いる超伝導赤外線検出器の開発,
SAT テクノロジー・ショーケース 2013 インデクシング・ポスター発表 (2013 年 1 月 12 日),
つくば国際会議場
21. 武内勇司: STJ developments for FIR photon spectroscopy at Tsukuba,
KEK 測定器開発室月例会議 SDC 重点レビュー (2012 年 12 月 18 日), 高エネルギー加速器研究機構
22. 金井伸也: 遠赤外分光のための NbAl-STJ の性能評価
日本物理学会 2012 年秋季大会 (2012 年 9 月 11 日-14 日), 京都産業大学
23. 武内勇司: 超伝導トンネル接合検出器,
LAPIS meeting(2012 年 8 月 24 日), ラピスセミコンダクター横浜テクノロジーセンター

24. 武内勇司：赤外線観測ロケット実験による宇宙背景ニュートリノ崩壊探索実験，
「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
2012, (2012年7月26日), 高エネルギー加速器研究機構研究本館小林ホール
25. 武内勇司：ニュートリノ崩壊の探索のための検出器開発 (Hf-STJ 他),
KEK 測定器開発室月例会議 SDC 重点レビュー (2012年4月17日), 高エネルギー加速器研究
機構

(3) 国際会議・研究会での講演・ポスター発表

1. Koji Sato, “Higgs Searches at the Tevatron,”
Standard Model @ LHC 2012, April 10 - 13, 2012, Copenhagen, Denmark.
2. Hideki Miyake, “CDF results on the search for rare $B_d, B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$ and $X_s \mu^+ \mu^-$ decays,”
ICHEP 2012, 36th International Conference on High Energy Physics, July 4 - 11, 2012,
Melbourne, Australia.
3. K. Hara, “Consideration of a Possible Detector at Fukushima Daiichi”, Muon Imaging
Workshop, May 22-25, 2012, KEK, Japan.
4. K. Hara and Y. Ikegami, “Silicon Strip Detectors for ATLAS at the HL-LHC Upgrade”,
PIXEL2012 Int. Workshop on Semiconductor Pixel Detectors for Particles and Imaging,
Sep. 3-7, 2012, Inawashiro, Japan.

(4) 会議・研究会報告書

1. S. Kim *et al.* :
“Development of superconducting tunnel junction photon detector using Hafnium”,
Physics Procedia 37, 667-674 (2012) (Proceedings of TIPP2011)
2. K. Hara *et al.* :
“Design of Punch-Through Protection of Silicon Microstrip Detector against Accelerator
Beam Splash”,
Physics Procedia 37, 838-843 (2012) (Proceedings of TIPP2011)
3. Y. Takahashi, K. Hara, S. Kim *et al.*:
“Performance of p-bulk microstrip sensors under $^{60}\text{Co}\gamma$ irradiation at rates expected at the
HL-LHC”,
Nucl. Instr. and Meth. A699 (2013) 107 (Proceedings of HSTD8)
4. K. Hara *et al.*:
“CDF silicon tracking detectors, 1988-2011”,
Nucl. Instr. and Meth. A699 (2013)84 (Proceedings of HSTD8)
5. 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.

(5) 学位論文

博士論文

1. 埴慶太: Search for the Standard Model Higgs Boson Decaying to Tau Pairs with the ATLAS
Detector (ATLAS 実験における $H \rightarrow \tau \tau$ 崩壊チャンネルを用いたヒッグス粒子の探索),
数理物質科学研究科物理学専攻, 2013年2月.

修士論文

筑波大学大学院数理物質科学研究科物理学専攻, 2013年2月.

1. 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光検出器の研究開発
2. 金井 伸也: 遠赤外光探索のためのニオブを用いた超伝導トンネル接合 (STJ) 検出器の研究開発
3. 石橋 貴生: 二重 SOI 層構造を持つ大面積電荷積分型 SOI ピクセル検出器の性能評価
4. 淵 遼亮: ILC 用細分割電磁カロリメータに用いる光検出器 MPPC の応答線形性の研究

【構成員の異動】

1. 2012年9月に倉田正和研究員が高エネルギー加速器研究機構研究員に転出.
2. 2013年3月に永井康一研究員が CERN 研究員へ転出.