

# CERN Summer Student Programme 2015 参加報告

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻

周 健 治

kshu@icepp.s.u-tokyo.ac.jp

2015年(平成27年)10月17日

## 1 概要

2015年7月5日から9月12日までの10週間、CERN Summer Student Programmeに参加した。ヨーロッパに加えアフリカ、アメリカ、アジアなどまさに世界中から来た約300人の学生とともに、CERNで活躍する研究者らによる講義を受け、実際に進められている研究プロジェクトに携わるといった活動を行った。私は、シリコンセンサーによる時間分解能の優れた検出器を用いた2つのプロジェクトに従事した。滞在の様子なども含め、活動内容を報告する。

## 2 活動内容

### 2.1 講義

プログラムの前半、6月下旬から8月上旬にかけて、午前中 Main Auditorium にて講義が開講された。標準模型から新物理まで、検出器や統計処理といったような実験的内容も含め幅広くカバーされ、良く準備されていた。さらには素粒子原子核実験で培った技術を応用した放射線治療やPETイメージングについても講義がなされ、CERNの活動範囲の広さに改めて驚いたものである。数ある講義の中で特に関心をもったのは、LHCにおける新物理探索についてであり、Run 1の結果を踏まえ、始まったばかりの13 TeVにおけるRun 2での展望が生き生きと語られていた。私はLHC実験とは直接接点のない実験を行っていたが、素粒子物理における重大局面である今、LHC Run 2に参加することは魅力的ではないか、と感じることもあった。

### 2.2 研究

シリコンセンサーは、飛跡トラッキングという用途に加え、薄い空乏層に一樣電場をかけキャリア速度を飽和させることで、時間応答の速い検出器として使用することができる。このようなセンサーと、高速・低ノイズなアンプを組み合わせることで、時間分解能の良い検出器を

作ることができる。私はそのような検出器の応用である、30 ps という極めて優れた時間分解能を持ったシリコン検出器によるPETイメージングマシンの開発と、LHCアップグレードに向けて改良されたATLAS-RPCの性能テストを行った。

#### 2.2.1 PETイメージングに用いるシリコン検出器の開発

PETイメージングでは、陽電子対消滅による2つの $\gamma$ 線到達時間差から放射性薬剤を吸収したがん細胞などの位置を再構成するため、時間分解能の優れた $\gamma$ 線検出器を用いることが必要となる。そこで、前述のように時間応答の速いシリコン検出器を用いたPETイメージングマシンが開発されている。このように優れた時間分解能を達成するには、信号の立ち上がり速度が速いことに加え、タイムング測定用電圧しきい値を越える時間のばらつきを抑えるために、低ノイズのアンプを合わせて開発する必要がある。私は、プロトタイプエレクトロニクスのパフォーマンステスト、テスト結果を踏まえたエレクトロニクスの再デザインを行うといったような、初期開発に参加した。

時間分解能に直結するパラメータとして、Equivalent Noise Charge(ENC)がある。これはノイズレベルと同等の大きさをもつシグナルを出力するのに必要な電荷を表すパラメータであり、実際のシグナルで得られる電荷量 $q_C$ を用いると、SN比を $S/N = q/q_e/ENC$ と計算できる\*1。時間分解能は $\frac{t_{Rise}}{S/N}$  ( $t_{Rise}$ はシグナルの立ち上がり時間)で決まるため、ENCが小さい程時間分解能が良くなる。私はまず、ゲイン・ノイズレベルをバイアス電圧に対してスキャンすることで、テスト用にデザインされたプロトタイプアンプのENCを測定した。測定結果は図1である。バイアス電圧を上昇させることでゲインが上昇し、ノイズの相対的な大きさが減少している。最も良い動作点において、300 electrons という測定結果が得られた。また、検出器本来の性能を評価するためには、電

\*1  $q_e$  は電荷素量。

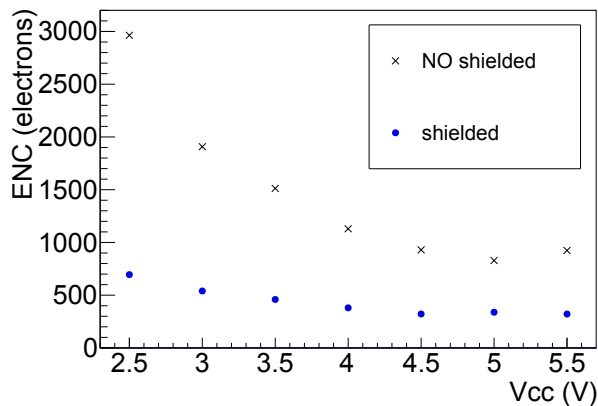


図1 バイアス電圧を変えていったときの ENC 測定。入力シグナルが小さいため、電磁ノイズが問題となる。

磁ノイズの影響を抑えるために、エレクトロニクスをファラデーケージで覆うことが必要であった。

この実験結果を解釈し、実際にシリコンセンサーと組み合わせた検出器をデザインするためには、プロトタイプアンプの入力端子インピーダンスの効果を評価する必要がある。入力インピーダンスが大きくなると、特にアンプのインピーダンスとのミスマッチが発生するため、合わせてデザインを最適化しなければいけない。このようなキャパシタンスの効果を測定するために、アンプ入力端子に小さなキャパシタンスを追加していきゲインの変化を測定した。この際、入力部には元々端子などがもつキャパシタンスが存在するため、入力キャパシタンスの絶対値を較正して求めなければいけない。これは、シミュレーションによってアンプを再現し、シミュレーションと実験におけるゲインのキャパシタンス依存性を比較することによって行った。計算・測定したゲインのキャパシタンス依存性を図2に示した。実測点がシミュレーションと合うよう水平方向へ平行移動することで、元々存在した入力キャパシタンスは10 pFであると推定された。これにより、先程述べた300 electrons ENCは入力キャパシタンス10 pFという条件における性能だということが分かった。これはほぼデザイン通りの性能であり、実際に1 pF程度のキャパシタンスをもつシリコンセンサーとエレクトロニクスを組み合わせた場合、200 electrons ENC程度が期待できる。

以上の測定に加え、シリコンセンサーと組み合わせたエレクトロニクスのデザイン、また、シグナル波高により電圧しきい値を越える時間が変わるタイムウオーク効果の補正も含めて期待される時間分解能の評価シミュレーションを行った。シミュレーションの結果、目標である30 psの時間分解能を達成可能と期待できるという結果が得られた。

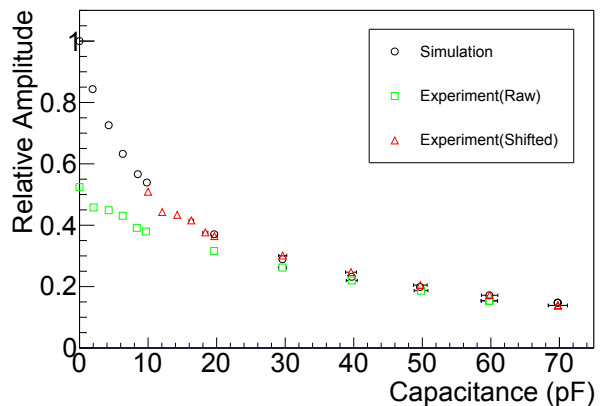


図2 アンプゲイン vs 入力キャパシタンス。縦軸は、シミュレーションにおいて入力キャパシタンスを0としたときのゲインに対する比。横軸は、黒丸凡例(simulation)ではシミュレーションにて入力したキャパシタンスを、緑四角凡例(Experiment(Raw))では実際に追加したキャパシタンスを表す。赤三角凡例(Experiment(Shifted))では、較正後の入力キャパシタンスの絶対値である。

その他の活動としては、検出器の時間分解能を測定するためのビームテストに向けた準備として、治具・アライメント機構の制作や解析コードの作成を行った。ビームテストは帰国前最終週に予定されていたが、延期となり参加できなくなってしまったのは至極残念である。

### 2.3 高ルミノシティ LHC 用 ATLAS-RPC 検出器の性能テスト

PET用センサーと似たアンプを用いた検出器として、ATLASにて<sup>\*2</sup>ミューオントリガーに使用されているRPCのビームテストに参加した。この試験は、SPSに今年新しく加わったGIF++というビームラインにて行われた。GIF++は14 TBqもの強度をもつ<sup>137</sup>Cs放射線線源を備えており、 $\gamma$ 線高放射環境下におけるミューオン検出を評価することができる。このような状況は、予定されている高ルミノシティLHCでの測定を模したものであり、テストしたRPCはそのような過酷な環境でも使用可能となるよう改良されたものである。

私は、ビームラインへの検出器インストール、DAQへ参加し、得られたデータの解析を行った。解析では主にミューオンの検出効率を求めた。 $\gamma$ 線の遮蔽強度を変化させつつ測定したミューオンの検出効率-バイアス電圧曲線が図3である。 $\gamma$ 線強度が高くなるにつれ検出効率が低下していくことが分かる。これは、強い放射によりガスに大きな電流が流れることで実効的な電圧が下がるた

<sup>\*2</sup> 同様のRPCはCMSでも使用されており、われわれはCMS-RPC、また、MicroMEGASのチームらとともにビームテストを行った。

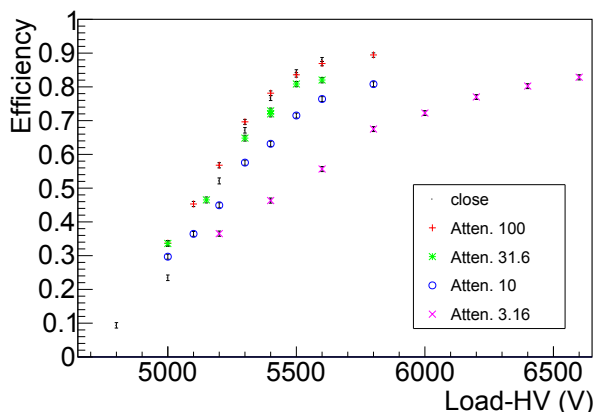


図3 RPCのミュオン検出効率-電圧曲線。図中 close は放射線源がない状態を表し, Atten. は遮蔽強度を表す。 $\gamma$ 線強度は最大で  $3 \text{ kHz/cm}^2$  である。

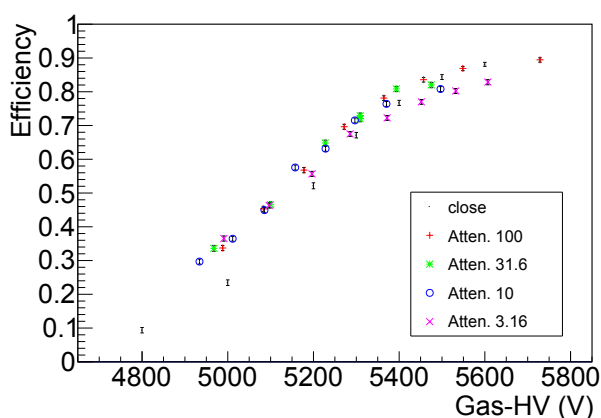


図4 電圧降下を補正した検出効率-電圧曲線。

めである。この電圧降下を、動作時の電流と別途測定した検出器の抵抗値により補正しプロットし直したのが図4である。 $\gamma$ 線強度によらずほぼ同様の検出効率を得られている。このテストにより、LHC ルミノシティに換算すると約  $1.5 \text{ pb}^{-1}\text{s}^{-1}$  といった強い放射環境下においても、新型 RPC は基本的には運用可能であることが分かった。

その他、時間分解能、シグナルクラスターサイズの評価等を行ったが、紙面の都合上省略する。

### 3 CERN での生活と今後

日々の生活のなかで印象に残っているのは、自分の国の料理をお互いに振る舞いあった夕食パーティーである。私も他の日本人参加者とともに日本食を振る舞い、食器洗いという形で大いに貢献した。普段の食事はイタリア人グループとともにすることが多かったのだが、彼らはイタリア食文化へのこだわりが強く、私が週に数回ピザを食べたりエスプレッソコーヒーを好むようになると、“Kenji, you are now Italian!!!” と言って喜んでいた様子であった。また、CERN には古いオフィスも多いのだが、私の職場は今年1月にできたばかりの新築で、空調完



図5 中央、右にいる中国人の友人が火鍋を振る舞ってくれた。向かって左の彼はイギリスでITを勉強しているブルガリア人の友人で、辛さに苦しんでいるようであった。



図6 オフィスにて撮影。なぜかダブルデッカーが屋内にあり、しばしば備えつけられたテーブルでミーティングが行われている。

備、コーヒーマシンも使い放題と言った非常に恵まれた環境であり、7月の異常な猛暑も快適にやり過ごすことができた。

来年以降も同様に日本の学生が参加し続けられるようになって欲しいと思う。今後は CERN Summer Student Programme で得た知識や経験を活かし、素粒子物理学の謎を明らかにしていくべく努力し続けたいと思う。

### 4 謝辞

CERN にて10週間私を指導してくださった Lorenzo Paolozzi さん、Marzio Nesi さん、プログラムに応募するにあたりご指導くださいました、指導教官の浅井祥仁教授、難波俊雄助教、研究室とサマースチューデントの先輩である安達俊介さん、山道智博さん、宮崎彬さん、滞在中良くしてくださった ATLAS 日本グループの皆さま、初めから最後まで面倒を見てくださった KEK 国際企画課の皆さま、そして楽しい時間をくれた他4名の日本人参加者に感謝致します。