

# CERN Summer Student Program 報告

東京大学大学院 理学系研究科

高木 敦子

takagi@nucl.phys.s.u-tokyo.jp

2010年10月29日

## 1 はじめに

私は今年 CERN(European Organization for Nuclear Research)サマープログラムに、2010年7月5日から9月12日の約10週間参加しました。日本からは修士課程1年の5名が参加しました。約2ヵ月間のプログラムの間、研究やまわりの人々から沢山のことを学びました。ここでは私の CERN での仕事、プログラムの内容、CERN での生活について報告いたします。

## 2 課題研究

### 2.1 研究目的

私は ATLAS 実験の vertex reconstruction group で研究をおこなった。私の研究の目的は LHC(Large Hadron Collider)における ATLAS 実験の vertex reconstruction efficiency と resolution の評価で、Root を用いて ATLAS のデータとモンテカルロシミュレーションのデータを解析した。

### 2.2 座標系と検出器

ATLAS 内部飛跡検出器の概要を図1に示す。ATLAS の座標系ではビーム方向は  $z$  軸で定義され、 $x-y$  平面はビーム軸に対して垂直に定義される。 $x$  軸の正の方向は LHC リングの中心と衝突点を結ぶ直線の衝突点から外に向かう線分として定義され、 $y$  軸はそれに対し垂直上向きに定義される。方位角  $\varphi$  は  $z$  軸周りに定義され、極角  $\theta$  はビーム軸からの角度を表す。Pseudo rapidity(擬ラピディティ)は  $\eta = -\ln \tan(\theta/2)$  で定義される。

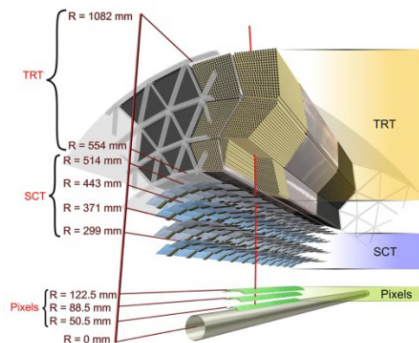


図1 ATLAS 内部飛跡検出器

荷電粒子のトラッキング、および衝突における vertex を決定する内部飛跡検出器は、内側から順に3層のシリコンピクセル検出器(pixel)、4層のシリコン検出器のストリップからなる semiconductor tracker(SCT), transition radiation detector(TRT)で構成されている。ATLAS 内部飛跡検出器は  $z$  軸周りに全方位、擬ラピディティ  $|\eta| < 2.5$  の範囲の測定が可能である。この範囲での磁場は2テスラであり、運動量の測定とトラッキングを行う。

### 2.3 Vertex Reconstruction の研究

二つの陽子のバンチの衝突は、さまざまな vertex topology を引き起こす(図2)。衝突が起こると、ビーム軸上に primary vertex が観測されるとともに、長寿命の粒子の崩壊、光子変換、jet 中の vertex、崩壊チェーン中の vertex が観測される。このような過程での vertex reconstruction はそれらの異なる topology から区別され、データ解析において重要な部分を形成している。低い transverse momentum ( $P_T$ ) を持つ多くの  $p-p$  相互作用(これらは minimum bias event と呼ばれる)中での深い非弾性衝突で生じる primary vertex を識別するのは LHC において非常に重要である。

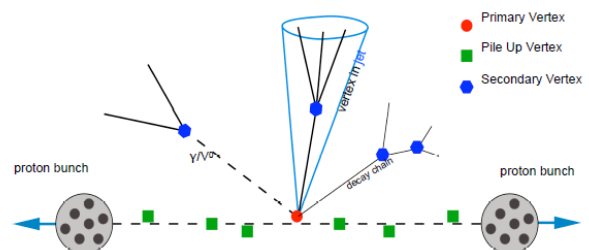


図2 Vertex topologies

### 2.4 $E_{cm} = 7 \text{ TeV}$ における primary vertex 分布

重心系エネルギー  $7 \text{ TeV}$  での衝突における primary vertex の  $x$  軸、 $z$  軸方向の位置分布を図3に示す。 $y$  方向の分布は  $x$  方向の分布とほぼ同じであった。この座標系では  $z$  軸方向はビーム方向であり、広がった分布を示しているが、

それは vertex の位置がビーム方向に沿って分布しているためである。これらより両方のプロットが妥当な分布を示していることがわかった。また primary vertex reconstruction は ATLAS における  $p-p$  衝突の luminosity の測定にも用いられる。

図 4 は 7 TeV で の衝突における  $x-y$  平面,  $x-z$  平面の primary vertex の散布図である。  $x-y$  平面の分布はビームスポットの大きさを示す。ビームスポットの形は非対称で衝突中心はアトラスの座標系の中心から少しずれていることがわかった。  $x-z$  平面の primary vertex の分布はビームの相互作用の範囲を示し, 相互作用の範囲にわずかな傾きが観測された。これらの特徴は ATLAS のビームによるもので, 予測されていた効果である。

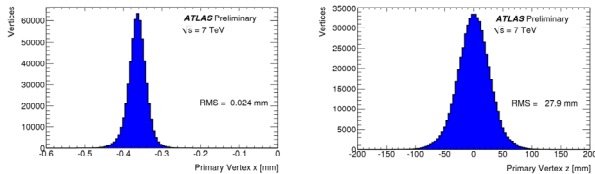


図 3 Primary vertex の位置

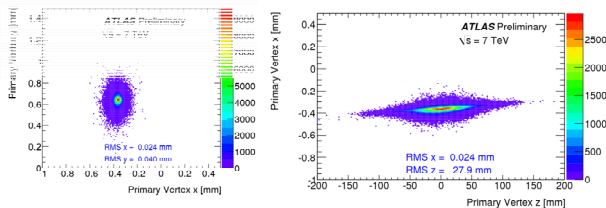


図 4 散布図

## 2.5 シミュレーション結果の reconstruction efficiency

私は三つの異なる vertex topology を持つモンテカルロシミュレーションデータの解析を行った。一つ目は  $W \rightarrow \tau\nu$  signal で平均 pile-up イベント数が 5 のもの, 二つ目は jet-jet signal で平均 pile-up イベント数が 2 のもの, 三つ目は  $t\bar{t}$  signal で平均 pile-up イベント数は 2 のデータである。

### 2.5.1 残差

適切な primary vertex を選ぶために, 残差(reconstructed primary vertex と true primary vertex の位置の差)が  $z$  軸方向に対して  $100 \mu\text{m}$  以下のものを用いた。そして, 図 5, 6, 7 に示したようにガウス関数を用いて残差分布をフィットした。フィッティングの結果は表 1 に示す。これらの図の結果から, モンテカルロのデータにおいて primary vertex の位置分布はとてもよく再構成できたことが分かった。

表 1 すべてのサンプルについてのフィッティング結果

signal	[mm]	$x$	$y$	$z$
$W \rightarrow \tau\nu$	mean	$-1.23 \times 10^{-4}$	$2.62 \times 10^{-5}$	$-1.66 \times 10^{-4}$
	$\sigma$	$2.61 \times 10^{-2}$	$2.58 \times 10^{-2}$	$5.23 \times 10^{-2}$
jet-jet	mean	$-1.89 \times 10^{-4}$	$2.09 \times 10^{-4}$	$-4.42 \times 10^{-4}$
	$\sigma$	$2.52 \times 10^{-2}$	$2.51 \times 10^{-2}$	$4.85 \times 10^{-2}$
$t\bar{t}$	mean	$9.21 \times 10^{-5}$	$-1.80 \times 10^{-4}$	$-1.24 \times 10^{-4}$
	$\sigma$	$1.49 \times 10^{-2}$	$1.49 \times 10^{-2}$	$3.11 \times 10^{-2}$

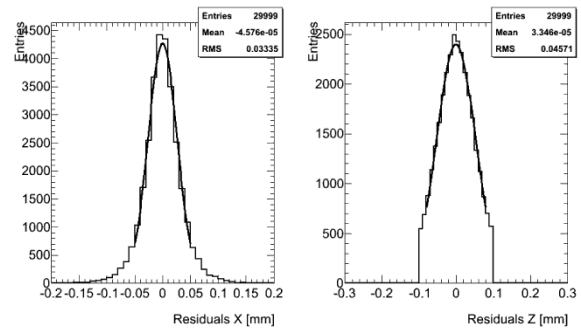


図 5  $W \rightarrow \tau\nu$  sample における  $x, z$  方向の残差

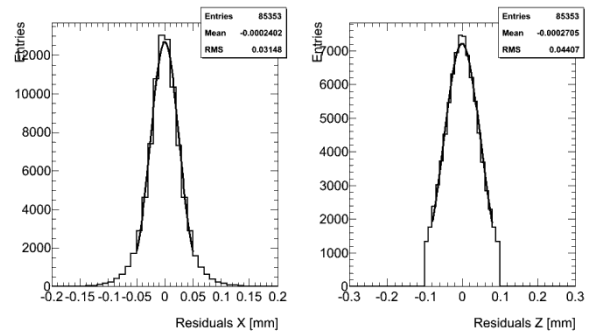


図 6  $t\bar{t}$  sample における  $x, z$  方向の残差

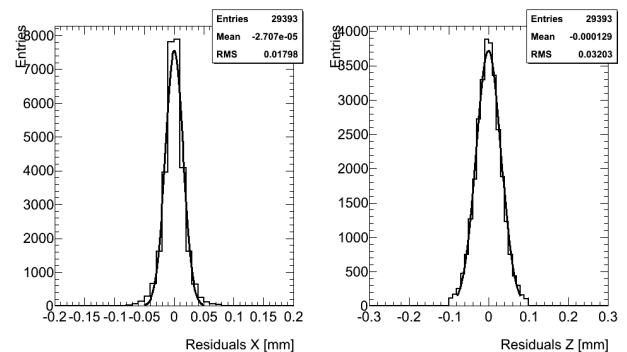


図 7 Jet-jet sample における  $x, z$  方向の残差

## 2.5.2 Reconstruction Efficiency

Reconstruction efficiency の測定において、 $z$  軸方向の残差による vertex のカットがどう影響するのかを評価するために、残差のカットを  $50\mu\text{m}$  から  $1000\mu\text{m}$  に変えて測定した。その結果を図 8 に示す。カットパラメータ  $100\mu\text{m}$  と  $1000\mu\text{m}$  の場合で、差がほとんど見られないことから、残差によるカットの影響は少ないと考えられる。

Vertex の決定精度を評価するために、先に述べた三つのサンプルについて vertex efficiency を再構成に用いられたトラック数および  $(P_T)^2$  の関数で表した(図 9, 10)。なおこれらの reconstruction efficiency は残差  $150\mu\text{m}$  でカットしたものをを用いて測定した。 $t\bar{t}$  signal の efficiency がほかの比べてよいのは  $t\bar{t}$  signal が高い  $P_T$  を持ち、トラック数が多いためである。Jet-jet signal の efficiency が  $W \rightarrow \tau\nu$  の efficiency に比べてよいのは pile-up イベントの数が少ないためである。

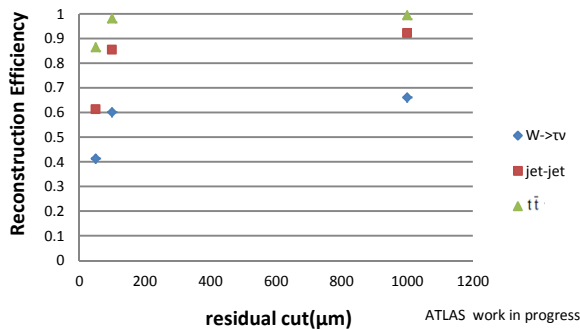


図 8 Reconstruction efficiency の残差カット依存性

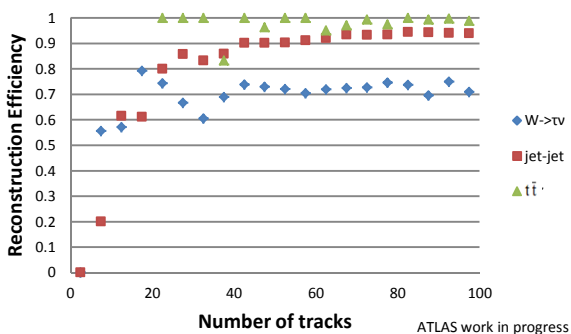


図 9 Reconstruction efficiency のトラック数依存性

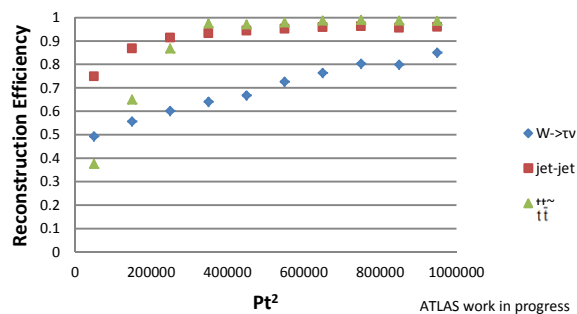


図 10 Reconstruction efficiency の  $P_T^2$  依存性

## 2.6 結論

Vertex reconstruction efficiency は transverse momentum, 平均 pile-up イベント数, トラック数に依存する。Vertex reconstruction efficiency は vertex が高い  $P_T$  を持ち, pile-up イベント数が少なく, トラックが多いほどよくなる。

## 3 CERN での他のプログラム

### 3.1 講義

CERN 滞在の前半は、午前中には講義があった。講義内容は学部レベルのものから専門的なものまで、徐々にレベルが上がる形で構成されていた。最終日の講義ではノーベル賞物理学者であるカルロ・ルビア氏による講義がおこなわれ、大変興味深かった。講義の後、議論する時間が与えられており、気軽に友人と議論したり、講師の方に質問することができた。ここで私が学んだことは自分の意見を言うことを恥じないということであった。理解できないことがあった時は、友人や講師の方に聞いて議論することで、理解が深まるが多かった。

### 3.2 ワークショップ

プログラムの間、いくつかのワークショップが開かれ、学生は一つ(希望すれば二つ以上)のワークショップに参加することができた。私は Root と Mad Graph のワークショップに参加した。Root のワークショップでは基本的な Root の使い方と TSelector を用いて TTree にアクセスする方法などを教わった。Mad Graph のワークショップではファインマンダイアグラムを自動で出力してくれるソフトを開発した開発者に直接使い方を習った。このワークショップに参加するまでそのようなソフトがあることも私は知らなかったもので、大変面白かった。

### 3.3 Visit

SM18 facility + ATLAS exhibition を見学するプログラムと LINAC + Computer Center を見学するプログラムが用意されており、どちらかを選んで参加することができた。私は LINAC の方を選択した。ビームラインや、加速器の大きな磁石を見るのはとても面白かった。また初めての Web server である World Wide Web(WWW)のコンピュータを見たりして、大変面白かった。

### 3.4 Student Session

私は 8 月 19 日に CERN での自分の研究について発表をおこなった。聴衆の前に立つととても緊張して、自分の言うべき内容を忘れないようにするので精いっぱいだったが、

この発表を機に物理だけでなく英語の勉強にも力を入れようと思えたよい経験となった。

## 4 CERN での生活

研究の後、学生同士でたくさんの活動をした。向こうでの研究生活でとても驚いたのは、ほとんどの研究者が 20 時近くには仕事を終えることであった。

### 4.1 週末

私は CERN でできた友人たちとスイスの様々な場所を訪れた。様々な国から来た友人と小旅行に出かけるのはとても楽しかった。私たちは自分たちの生活のことや政治観、宗教観などいろいろなことについて話した。このような経験は海外旅行などでは体験できないすばらしいものとなった。



図 11 ジュネーブ湖でサマーチューデントのみんなと

### 4.2 パーティ

ほぼ毎週、金曜日にはパーティが開かれた。パーティは新しい友人を作り、仲良くなる助けとなった。サマーチューデントチームによって企画されるものもあれば、個人の企画のパーティもあった。CERN の近くに住んでいるサマーチューデントの家でバーベキューをしたり、日本の ATLAS 実験グループの方々のパーティに行ったり、筑波大の学生さんたちのホステルで夕ご飯をご馳走になったり、たくさんの出会いがあり、どのパーティも研究のストレスを解消してくれるとても楽しい時間となった。

### 4.3 友人

CERN 滞在中に、たくさんの出会いがあり、たくさん友人を作ることができた。共通の興味である物理だけでなく、われわれの政府、経済、宗教など様々な話を通して、いろいろな考え方に触れることができた。Face Book が向こうで携帯を持たない私たちのコミュニケーションツールとなっ

ていたので、アカウントを作ったら、あっという間に 100 人の友人ができた。これからも、時々連絡を取り合っていきたいし、いつか世界のどこかでまた会えることを願っている。

また、日本人サマーチューデントの王くん、下島さん、富田さん、長坂くんとは特に親しくなり、お互いに支えあえたことに感謝している。

## 5 将来の展望

このプログラムに参加する間、私は自分の将来のキャリアについて考えていた。まだはっきりとは決まっていなかったけれど、研究者としての生活や心構えをこのプログラムを通して、少し知ることができた。このような経験は研究者を目指すたくさんの学生にとって必要であると感じた。研究者としてやっていく楽しさを感じると同時に、厳しさも感じる事ができたので、自分を支えることがいかに大切かを知ることができた。

## 6 今後このプログラムに望むこと

このプログラムの参加者のほとんどが学部生だったので、このプログラムが学部生にも開かれることを望みます。現在は修士の一年生向けですが、このプログラムは学部 3 年生以上なら十分ついていけるように構成されています。

## 7 謝辞

最後になりましたが、このプログラムを準備し、支えて下さったすべての方々に感謝いたします。特に CERN で病気になる際にお世話になった山口さん、CERN での生活を助けてくださった福田さん、このプログラムへの参加のサポートをしてくださった石川さんをはじめ KEK のスタッフの方々にはたくさん支えていただきました。

また、CERN で私の研究を指導し、励まして下さった指導教官のキリルとアンドレアスにも、とても感謝しています。