

CERN Summer School 2010 活動報告

東京大学大学院 理学系研究科 物理学専攻 修士課程一年

王 佳寅

jiayin.hep.wang@10.alumni.u-tokyo.ac.jp

2010年11月14日

1 はじめに

私は CERN Summer School¹2010 に、本年 6 月 23 日から 8 月 13 日までの約 8 週間、参加させていただきました。この場を借りて、当プログラムに参加して得られた、かけがえのない体験を報告します。

2 活動内容

CERN Summer Student Programme は、様々な分野の研究者が自身の専門分野に関しておこなう講義を聴講する部分と、CERN で実際に研究をおこなっているグループにそれぞれの学生が配属されてグループの中で実際の研究に従事するという部分で構成されていました。

2.1 講義に関して

講義は 7 月 5 日から 8 月 13 日までの 6 週間、平日の午前中に 45 分を 3 コマずつというスケジュールでおこなわれました。Summer Students には物理学(実験・理論)の学生のみならず、数学・化学・計算機科学、はては建築学の学生もいる上、日本以外から来ていた学生はどうやら学部生も多かったようで、講義の前半は「素粒子とは何か」や「量子力学と相対性理論」、「検出器」といった比較的基礎的な内容から始まりました。しかし、回を追うごとにだんだん「データ収集システム」や「CP 対称性の破れ」、「標準模型を超える物理」などといった各論を深く掘り下げてゆく形式になっていきました。

多くの講義の中に、笑いを誘うようなスライドや機知に富んだジョークが織り込まれていて、「本当に楽しそうに物理の話をするなあ」と思わずにはいられなかったし、「表現する能力が高い人が多いなあ」とも感じました。ただ、や

¹ CERN が約 50 年前から、物理学徒の育成と研究のアウトリーチ活動の一環としておこなっている事業。現在、CERN で活躍する研究者の中には過去に当プログラムに参加した人も多い。日本は 2003 年度からオブザーバー国として参加を開始。本年の正規の参加者は 950 人以上の応募の中から 146 人を選出(非正規の参加者を含めると 300 人以上が参加。非正規の学生は費用を自己負担)。

はり講義プログラムの後半に近づくにつれ、内容が高度になってゆくと導入部分の説明と実際に核となる部分の内容にかなり飛躍があるように感じられる講義もありました。

後述しますが、ちょうど講義が始まった時期に、配属先のグループの仕事として新しい検出器を test beam に当てるといふ実験のシフトワークがあり、いくばくかの講義をスキップせざるを得ない状況になったが、講義自体を録画したものが web にアップロードされるというシステムによって、時間の都合が付かない講義に関しても聴講できました。また、このシステムは講義の復習をするのにも役立ったので、講義後に設けられた質問の時間とあいまって、理解を深めるのに非常に役に立ちました。日本の高等教育機関にもこのような制度が導入されれば素晴らしいと感じました。

2.2 配属先のグループでの活動

私は Jörg Wotschack 博士のグループで MicroMEGAS (MM) という粒子検出器の研究開発の仕事をしました。比較的高頻度の粒子検出も可能であることが分かっており、数年後に予定される LHC の Super-LHC への(ビーム衝突の輝度を 10 倍に上げる)アップグレードの際に、ATLAS 検出器のフロントエンドのミュオン検出器として使用できると期待されています(図 1 参照)。

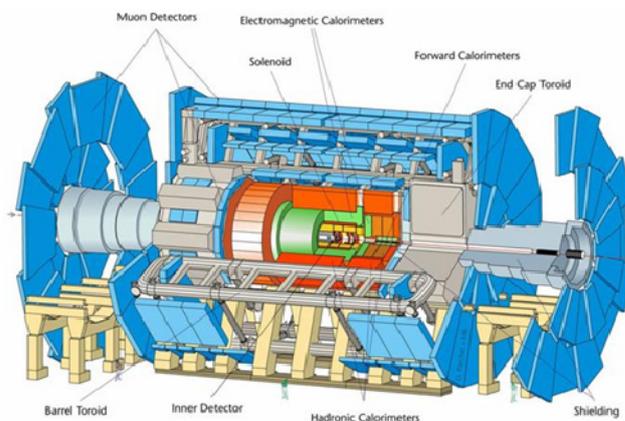


図 1 稼働中の ATLAS 検出器の構造
ミュオン検出器の位置を確認できると思います[1]。

Minimum ionizing particle としてのミュオン粒子を検出するためには、 10^4 倍以上の信号増幅率が必要だが、MM はこの増幅率を達成することが出来ます。

輝度が大きくなれば、衝突の際の生成粒子数もそれに従って増加するので、新しい検出器に課される不感時間に対する条件は現在使われているものより格段に厳しくなります。その条件を満たす候補として MM は有力視されています。

われわれは MM の振る舞いを理解し、性質を改善するために一連の実験と開発をおこなっています。その中で私は MM のガス増幅率の電圧依存性や宇宙線に対する振る舞いなどの基本的なデスクトップの測定と、ビームテストでの準備とシフトワーク、およびビームテストで得られたデータの解析の一部をおこないました。私がした仕事の中でもっとも多く時間を割いたのはビームテストで得られたデータの解析なので、ここではおもにその内容に関して説明します。

2.2.1 MicroMEGAS とは？

MicroMEGAS 検出器は、1996 年に Giomataris 氏のグループで発明されたガス増幅検出器で、その名称の由来は Micro MESH GAseous Structure です。

名称の由来の通り、MM は drift cathode plane(DCP) と anode plane 二枚の平行極板の間にガスが流れている構造になっています。DCP と anode plane は約 5mm 離れており、さらにガス増幅の空間を作るために anode plane に非常に近い位置(距離約 $150\mu\text{m}$) に高電圧をかけることの出来る mesh が平行に配置されています。

DCP-mesh 間、mesh-anode 間にはそれぞれ約 200 V と約 500 V の電圧がかかっているので、前者では電場の強さは比較的小さく、後者では非常に大きくなります。電場の強さによって、電子が増幅されるか否かが決まります。DCP-mesh 間では入射する荷電粒子により気体分子が電離させられ、入射粒子が持っている運動エネルギーに応じて異なる数の電子が放出されるのに対して、mesh-anode 間では放出された電子が強い電場に加速されてさらに多くのガス分子を電離させ、電子の雪崩的な増幅が見られます。この役割の違いから DCP-mesh 間の空間を conversion gap(入射粒子が電離で失うエネルギーをそれに比例した数の電子に変えるため)と呼び、mesh-anode 間の空間を amplification gap と呼びます。

Anode plane には読み出し strip が平行に(図 2 でいうと絵が描かれている平面に対して垂直な方向に)走っています。Amplification gap での電子雪崩によって増幅された信号は、これらの読み出し strip によって取り出されます。

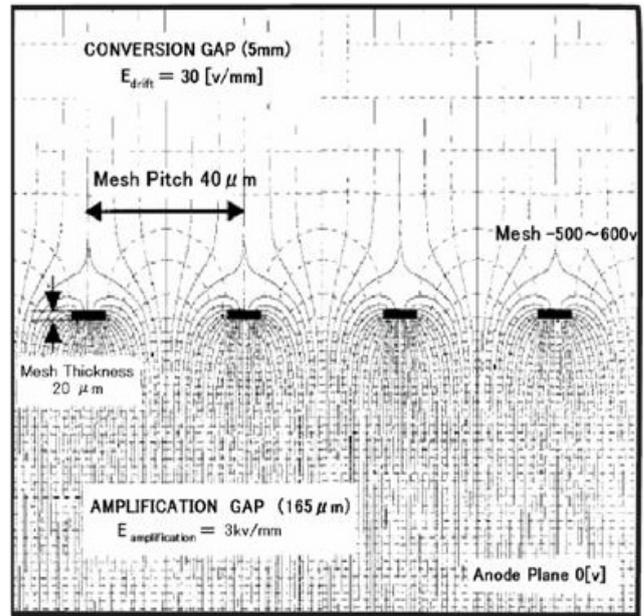


図 2 MM 内部の電気力線の様子

Amplification gap での電場の強さが conversion gap でのそれよりもずっと大きいことが読み取れます[2]。

2.2.2 Resistive Chamber とは？

不感時間が比較的短いとされる MM でも、現状のままではアップグレード後の輝度には対応できないと考えられています。それは amplification gap における電子雪崩が過剰に起こり(これを spark と呼びます)、mesh-anode 間の高電圧が落ちてしまうことが原因です。従って、不感時間を減少させるためには spark が起こる回数自体を減らすように努力するか、spark が起きても mesh-anode 間の高電圧が落ちないように工夫を施すことが必要です。

前述のように、spark は短時間中に複数の入射荷電粒子が検出器に入射することで電子雪崩が過剰になることで引き起こされるので、同じ数で同じエネルギー分布を持つ入射荷電粒子の集団に対して spark を減らすためには増幅率を小さくすることが必要となります。しかし、ミュオン検出器として利用するためには 10^4 倍の信号増幅率が必要なので、spark の回数自体を減らそうという考え方は現実的ではありません。そこで採用された方法は、anode plane 上の読み出し strip の上に誘電体をコーティングし、さらにその上に読み出し strip と平行に高比抵抗の strip を配置することで、mesh-anode 間の高電圧を落ちにくくするという方法でした。このように作られた MM 検出器のことを resistive chamber と呼びます(図 3)。

われわれのグループでは、この resistive chamber の振る舞いを理解するために、一連の実験をしています。次の節では、その中でも特に時間を掛けた、検出器を 120 GeV のパイ中間子ビームに曝しておこなったビームテストに関して説明します。

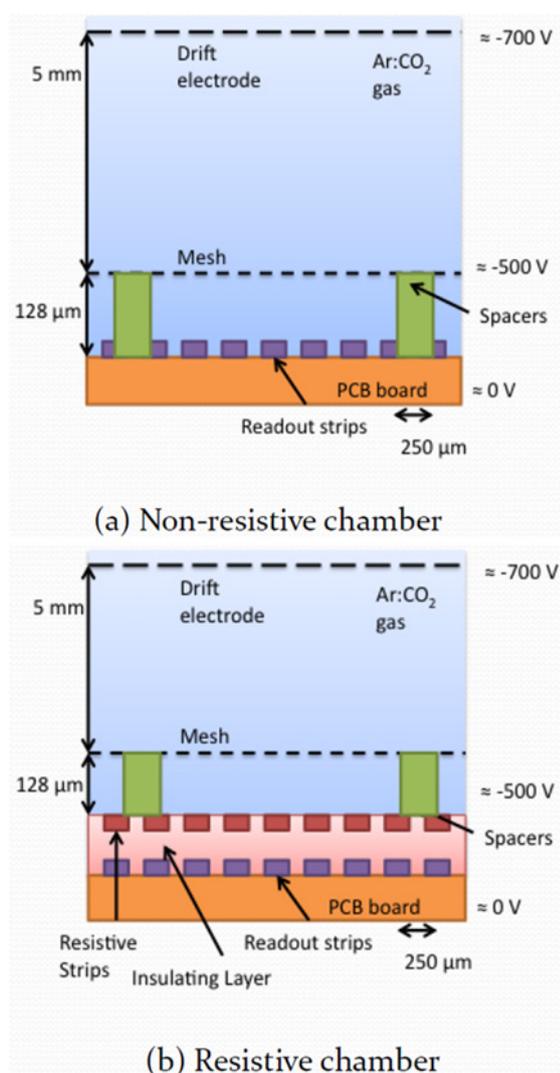


図 3 普通の MM と resistive chamber の比較

2.2.3 ビームテスト

CERN には、本部が置かれているスイス側の Meyrin site と、Super Proton Synchrotron (SPS) から発射されたテストビームで実験をおこなうことのできる Preveessin site が存在します。私どもはこの Preveessin site で、開発した resistive chamber を 120 GeV のパイ中間子のテストビームに曝して 3 週間ほどデータを採りました。

MM に用いた気体は、アルゴンと二酸化炭素の混合気体で、混合比を $\text{Ar} : \text{CO}_2 = 85\% : 15\%$ と $93\% : 7\%$ の二種類です。二酸化炭素は過剰な電子雪崩が起きるのを防ぐための緩和剤としてよく用いられます。

このビームテストでのセットアップは図 4、5 に示されているように、テストビームが来る上流から順に、

1. ビームプロファイルを確認するための wire chamber、
2. われわれのグループで開発した MicroMEGAS の resistive chamber、

3. ビームの軌道を再構成し、解析のための情報を与えるための silicon telescope (Module #1、 #3、 and #6 ; 図中に黄緑色(濃い灰色)で示されている)、
 4. トリガーとして利用するための信号を出すための scintillator (四つ)、
- が配置されています。

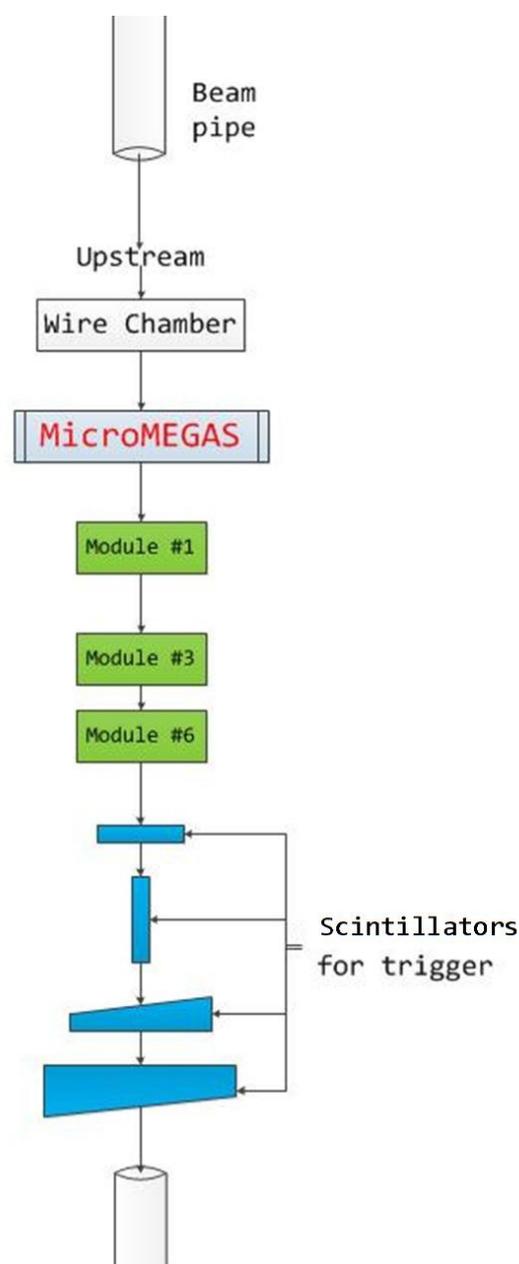


図 4 ビームテストでのセットアップ

四つの scintillator をすべて通った荷電粒子が存在する場合、silicon telescope と MM に「データを採れ」という指令を送り、その粒子がそれぞれの検出器を通った時の信号を記録するようになっています。

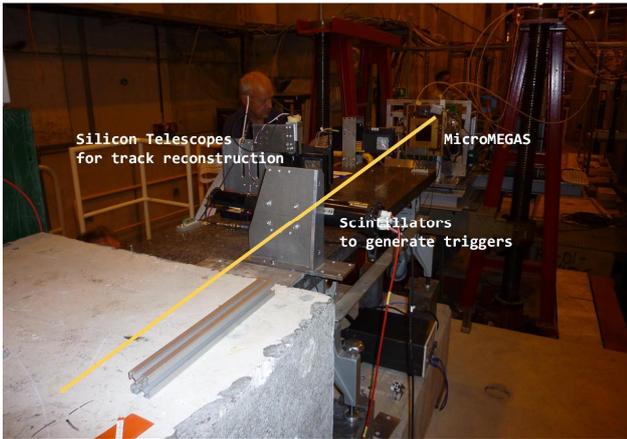


図5 ビームテストでのセットアップ

写真の右側が上流方向で、test beam は右から左に飛んできます。写真に写っているのが私の supervisor の Jörg Wotschack です。

ビームテストの間中は毎日 16 時から、グループでミーティングを開き、前日の測定の内容と解決済・未解決の問題点、これからする測定の具体的な目的や内容の共有化を図ったことは、「このように実験を進めていくのかあ」と非常に勉強になりました。

2.2.4 私の仕事

われわれのグループでは、ハードウェアに長けている人材が多いのに対して、解析のプログラムを書くことの出来る人が非常に少なく、オンラインのデータ解析のシステムも、オフラインのそれも他のグループに所属している人に外注していた状況でした。現在のオンラインのデータ解析のソフトウェアは、半年に一度ほど約 10 日間アメリカから CERN にやってきてグループのためにソフトウェアを書くことになっている二人の研究者 W. C. Park と V. Kaushik が準備したものでした。

彼らのプログラムは MM から得られた生のデータの形から解析に使用できるように生成したデータと、silicon telescope からの生のデータを、解析フレームワークである ROOT の Ntuple という形にして保存するものでした。

私どもの目標の一つは、resistive chamber の位置分解能を測定することだったので、silicon telescope のデータから粒子の軌跡を再構成し、MM のどの位置を粒子が通ったはずかという情報を引き出し、その情報と実際の MM の信号から得られた軌跡の情報を比較する必要があります。従って、上記のソフトウェアだけでは、silicon telescope からのデータが生のままだし、MM とのアラインメントもとれていず、粒子の軌跡を再構成できません。そこで、私が任された仕事は、以前からソフトウェアの手伝いをしてもらっている、他のグループのポスドク研究員をしている K. Nikolopoulos と協力して、

1. MM と silicon telescope のアラインメントを整えること、
 2. Silicon telescope の各々のイベントの信号から、予測される入射粒子の軌跡を再構成すること、
 3. 再構成した粒子の軌跡を MM の位置に外挿すること、
- を済ませてから、そのデータをもう一度 Ntuple の形式のファイルに詰めなおすことでした。

上記の仕事に入る前に、全体像を把握するために、まず ShowAlign というプログラムを書きました。そのプログラムの機能を以下に説明します。

1. ディレクトリの中にある .root ファイルを認識し、ユーザに開きたいファイルの番号を尋ねる。ユーザが指定したファイルが存在する場合はファイルを開き、存在しない場合はエラーメッセージを表示する。
2. MM と silicon telescope から得られた信号からビームプロファイルを表示して、アラインメントのために各々の検出器の位置座標をずらす量をユーザに尋ね、ずらした後のビームプロファイルを表示して、それで満足かどうかユーザに尋ねる。満足でない場合は、再びずらす量を尋ねる(図 6)。

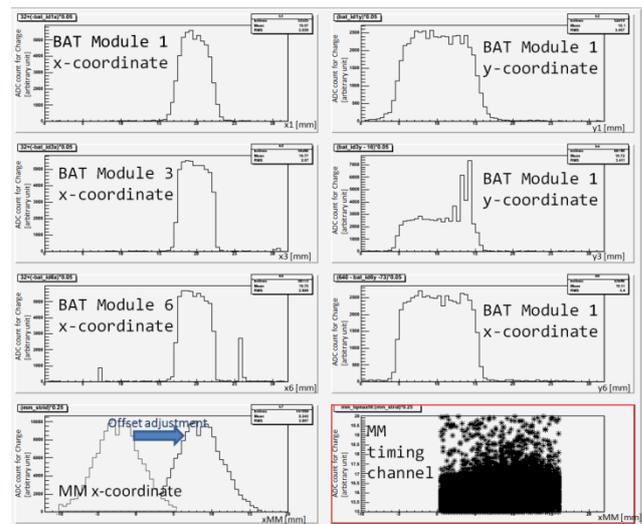


図6 ShowAlign プログラムで MM のアラインメントを整えたときの before-after

一番上の段から三段目まではそれぞれ silicon telescope module 1、3、6 の x-座標 vs. 信号の電荷量、y-座標 vs. 信号の電荷量、一番下の段が MM の x-座標 vs. 信号の電荷量、MM の x-座標 vs. 信号の到着時間を表しています。

3. アラインメントが整ったら、ユーザが表示したいイベント番号を尋ね、そのイベント番号に対してそれぞれの検出器を粒子が通った位置情報と信号の大きさを表示することを繰り返す。ユーザが番号を入力した場合はそのイベント番号に対応するデータを表示し、番号の代わりに Enter ボタンを押した場合は表示されているイベント番号の次の番号に対応するデータを表示することを繰り返す(図 7)。

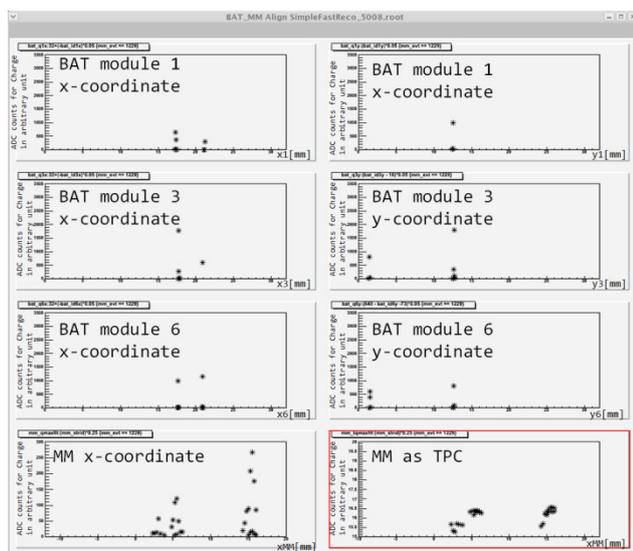


図7 ShowAlign プログラムであるイベント番号を指定して、各検出器で得られたデータを表示させたもの

一番上の段から三段目まではそれぞれ silicon telescope module 1、3、6 の x-座標 vs. 信号の電荷量、y-座標 vs. 信号の電荷量、一番下の段が MM の x-座標 vs. 信号の電荷量、MM の x-座標 vs. 信号の到着時間を表しています。右下端のプロットは MM が time projection chamber (TPC) として働いたときに、入射粒子の軌跡を検出できることを示しています。入射粒子の軌跡が斜めになっているのは、このデータを採ったとき、MM をビームに対して 40° ほど傾けていたためです。

これらの動作をする ShowAlign プログラムによって、われわれのグループでは初めて、複数の粒子が同時に MM を通過した時にも、きちんと TPC として機能することが確認されました(図7)。

この ShowAlign プログラムを書いていたとき、骨格が出来上がった後も、supervisor である Jörg に何度も「この部分を自動化して欲しい」という注文を受けて、多くの時間を自動化に割くことになりました。やっていた当時は、「全体像をつかむための練習としてやっているだけなのだから、どうしてこれほどの自動化が必要なのか」という疑問や、「恐らく、僕がいなくなった後も、あまりプログラミング言語に親しくない人が使うためのものだろう」という自分なりの理由をつけていました。しかし、最終的に様々な自動化をして、インタラクティブに動くようなプログラムを書いたことによって、実際に複数の粒子が斜めに MM を横切った時もきちんと TPC として働くことを確認できたときは、「このような意図があって僕に自動化するように指示していたのか」と、とっても感動しました。1 万イベント中、複数の粒子が同時に検出器を通過するのは 5 イベント以下だったことを考えると、自動化していなかったらこのようなイベントを見つけるのはなかなか難しかったのではと考えられます。

この仕事の後に、私は K. Nikolopoulos をとともに前述した解析ソフトウェアの仕事に着手しましたが、それが大きく前進する前に、彼がバカンスに行ってしまうました。その後、私が日本に帰国する 2 週間くらい前に新しくグループにフェローとして参画した Marcin Byszewski とともに同じ仕事に取り組みましたが、実際にはその仕事を終えることはできませんでした。私が、帰国してからひと月ほどたった後に連絡を取った時にも完全にはできあがってはいなかったようなので、残念ながら私が持っていた力では容易に達成できる仕事ではなかったのかもしれない。しかし、このことは非常に悔しい思い出として残っています。

3 CERN での生活 etc.

ここでは、CERN での平日の生活や、週末の過ごし方などについて紹介します。

7 月の第二週に講義が始まる前までの二週間は、すべての時間をグループの仕事に使うことができました。ただし、到着後 1 週間くらいは時差ぼけを解消し、新しい食事や英語で一日中過ごす生活、新しいグループの研究内容に慣れるのが精いっぱい、とにかく時間が経つのがはやかったと感じていました。CERN に到着した当時はちょうど夏至に近く、サマータイムになっていることも相まって、夜の 10 時過ぎまで空がほのかに明るいという季節で、日が暮れて 1 時間もすると真夜中を過ぎてしまうという時間感覚に苦しめられた印象が強い期間でした。夜寝るのが遅い割には、5 時くらいに目を覚ましてしまう日が多かったように思います。また、初めの週末は、まさに地元のスイスのナショナルチームが FIFA World Cup の予選リーグの最終戦を戦っていて、勝てば決勝トーナメントに進めるという試合がおこなわれていたので、知り合ったばかりの各国の友人とともに金曜の夜にジュネーブ市街に繰り出し、大きな TV スクリーンがある広場でサッカー中継を観戦しました。



図8 私の仲間たち

左から、イギリスから来た Asish、私、日本から来た仲間の Yushi。Welcome Drink にて。

二週目には、僕より2週間くらい前にアメリカから来ていた非正規の summer student の Alexandra Moskaleva がすでに進めつつあった、増幅率の高電圧依存性や宇宙線の測定などのデスクトップの実験をとにもおこないつつ、自分のC++プログラミング言語の知識を増やすことに費やしました。この週くらいから、CERNの生活にも慣れ、充実した生活を送っているなど感じるようになりました。週末には、私が所属していたサークルの後輩のカップルが東京大学後期教養学部の留学制度 AIKOM でそれぞれジュネーブとグルノーブル(フランス)に留学していたので、合流してジュネーブの街を案内してもらったりしました。その二人は文系の学生で、表象文化論とフランス文学の研究者を目指していたので、彼らが専門としている分野の話の聞いたり、基礎研究としての素粒子実験物理学の話をしたりと、日本でもしたことのないような話に花が咲きました。

講義が始まってからは、午前中は講義、午後はグループの仕事という行動パターンになり、グループの仕事に割ける時間が一気に短くなったと感じていました。この週の次の週から3週間ほど、ビームテストがあり、その間はシフトワークを毎日16時から24時までとっていたので、ソフトウェアの仕事をする時間がより短くなりました。その時間を確保するために、興味がある講義に選択的に出席するようにしました。

ビームテストが終わった週には、私たちのグループが中心となって、一緒に仕事をしたギリシャ人のグループ、中国人のグループとともにピクニックに出かけました。一つの仕事を終えたときの打ち上げは格別でした。その日は、普段よりも饒舌になり、英語も3割増くらい話せた気がします。

その場で、私はオペラの曲を歌ったのですが、その動画がグループの仲間によって大手動画共有サイトにアップロードされています。

ビームテストが終わった後は、いよいよ本格的にソフトウェアの仕事をするに多くの力を注ぎました。また、このころから帰国の時期が気になりだし、夜中に遅くまで仕事をするようになりました(CERNでは多くの研究者は、日本の研究者よりもライフワークバランスがよかったので、私もそれに合わせていましたが、それもここまででした)。

とはいうものの、食事のときに友人とするおしゃべりや、コーヒブレイク、週末の旅行など余暇の時間を十分にとれていたと感じています。

週末には、3年ほど前に東京大学に留学していたスイス人と日本人のハーフの友人 Naoki Peter にスイスの首都ベルンを案内してもらったり、叔父の教え子でドイツ人と家庭を持った王静のお宅にお邪魔したり、仲間の summer student たちと一緒にジュネーブの花火をみたり、イタリアはミラ

ノへ一人旅に出かけたり、ICEPPのBBQや筑波大から来ていた学生たちとの食事会などに参加したり、高校2年生の時にアメリカで知り合ったアメリカ人の友人が仕事でジュネーブに来ていて再会したりして、本当に楽しい時間を過ごしました。

食事に関してですが、野菜をたくさん食べる私は、食堂の本当に多種多様なサラダバーを重宝しました。おかげで非常に体調よく過ごすことができました。難点は価格が東京に比べても割高な点だけでした。

私が帰国する週末には、グループのおもだったメンバーがフェアウェル・ランチに集まってくれて、今思い出しても目頭が熱くなります(図9)。

私にとっては、これらの他にも書ききれないほどの思い出が詰まっている、本当に充実した8週間でした。



図9 グループの主要メンバー
フェアウェル・ランチにて。

4 今後の抱負

CERN Summer School 2010に参加させていただいて、本当に様々な経験をしました。

ある程度自信を持っていた英語力に関しては、その自信が粉々になったし、日本で教育を受けた中国人として異文化と触れる中で、自分のアイデンティティを揺さぶられました。

また西洋の研究者の基礎研究に対する考え方や取り組み方を目の当たりにして、学ぶことは非常に沢山あったと考えています。

中でも、私どものグループの仕事に協力してくれているドイツの大学の博士課程のイタリア人学生 Marco Villa から聞いた話は強烈でした。彼は修士を終えてから物理学からは離れて過ごしたそうです。それは、自分が本当にやりたいこと・やりたくないことに関して考える時間だったそうです。その結果、彼が人生においてどうしても取り組みたいのは、基礎科学としての物理学を研究することで人類に

より確かな知をもたらすことだということでした。その判断をきちんとおこなった彼は、研究に対して非常に勤勉で、また本当に楽しそうに研究に取り組んでいました。

私は、これまでなんとなく物理学を学ぶことが好きで進んできました。しかし、できあがった学問を学ぶことが好きであるのと、研究を進めてその学問を少しずつ構築してゆくことはまったく違うことです。修士課程では、その二つの営みの接合部分に当たる取り組みをすることになっています。そのことは意識してきたつもりでしたが、やはり「ほとんどみんなが大学院に進むのだから」という理由で修士課程に進んだ部分もあります。

昨年度に始まった事業仕分けをきっかけに、私自身は基礎科学の研究が社会に果たす役割や「開かれた世界秩序における国の個性」に関して深く考えるようになりました。その中で、血税によって支えられている国家的事業である基礎研究に従事する人間としての自分の取り組み方を顧みることが多々あります。

今回の CERN Summer School に参加させていただいて、強く感じるようになったことは、「私はやはり社会に出てみて、その中で基礎研究の位置づけをもう一度把握したい。その上で、やはり物理学の研究に従事したい」という強い思いが揺らがなければ、戻ってきたい。」ということです。もちろん、そのような選択をする場合、素粒子物理学の研究者として決して平坦な道のりが待っているわけではないことは理解しているつもりだし、必ずしも博士課程に進まないということを意味するわけではありません。しかし、社会に出ることを意識しながら研究生活を送る方が私自身にとっても、私を育ててくれ、これほどにかけがえのない経験をする機会を与えてくれた日本社会にとっても有益な行動ができるようになって考えています。

私の当面の目標は、社会に出ることを意識して行動しつつ、CERN で出会った友人たちに負けないように研究に励むことです。

5 今後このサマースチューデントプログラムへ望むこと

このプログラムを通じて、私の人生にとって本当にかげがえのない経験を得ることができました。その中で、個人的に改善の余地があると考えているのは、以下の二点です。

1. (年度を跨ぐので難しいかもしれませんが)参加者の募集の告知をもう少し早くおこない、可能であれば応募資格に英語の資格試験の点数などを課す、もしくは選出後に英語のトレーニングプログラムに参加させることを義務化するなどの、事前に参加予定者の英語力を向上させる方策をとること。

2. 昨年度まで CERN からの給与は、銀行口座に振り込まれていたと聞きますが、今年日本からの参加者には銀行口座は開かれず、郵便局から一ヵ月分の給与をキャッシュで渡されて、それを自分のホステルの部屋で保管していたこと(CERN の敷地内の警備体制を考えると、特段危険ではないと言えるかもしれないが、やはり約 20 万円ものキャッシュをホステルの机の引き出しに保管するのは不安です)。

他にも数点ありますが、これは日本側が何かできることではないのと、Summer Student Team のアンケートに書いたので、割愛します。

6 謝辞

最後に、このプログラムに参加した私を様々な面で強力にご支援くださいました方々に、心からの感謝を申し上げます。

このプログラムに推薦して下さった相原博昭先生、応募書類の書き方に関してご指導くださった岩崎昌子先生、本当にありがとうございました。

研究室の先輩で、本プログラムの先輩でもある中山浩さんと宮武広直さんには、CERN での研究面や生活面での注意事項や、夢が膨らむようなお話、様々な助言をいただきました。お蔭で安心して出発の準備をすることができました。

VISA の取得や航空券の手配などに代表される出発前の様々な手続きから、スイスに渡ってからの心温まるご連絡、帰国後の振込などの手続きと、現在に至るまでお世話になりっぱなし(ご迷惑をかけ通し)の高エネルギー加速器研究機構国際企画課国際企画第三係の石川浩也様と西村恵美子様には、どれほど感謝してもしきれません。

CERN についてからは Sharon Hobson をはじめとする Summer Student Team のみなさん、所属グループのリーダーで私の supervisor の Jörg Wotschack と second supervisor の George Glonti をはじめとする大きなグループのみんな、summer student の友人のみんな、summer student 以外で知り合った友人のみんなにたくさんお世話になりました。素晴らしい毎日を本当にありがとうございました。

また、食堂でお会いするごとに、お忙しいにもかかわらず時間をとって話を聞いてくださった早野龍五先生と、高エネルギー加速器研究機構から CERN に駐在されていた福田浩様のお蔭で、スイス滞在中も非常に心強かったです。

食事会や BBQ に招待して下さった、筑波大学素粒子実験室の皆様・ATLAS Japan の皆様、楽しい時間をありがとうございました。

一緒に日本から参加した Yushi、Atsuko、Natsuki、Sumire とは、英語で話すのに疲れ切った時に勇気づけてもらうことが数えきれないほどありました。感謝しています。これからもよき友人・ライバルとしてよろしく願います。

ここには書ききれませんが、このほかにも、数えきれないほどの方々にお世話になりました。また、このプログラムを私どもの目には見えない陰から支えてくださっている方々が大勢おられると存じます。その方々も含め、このプログラムに関わるすべての方に心から感謝を申し上げます。本当に、本当にありがとうございました。

最後となりましたが、精神的に参っているときに遠い日本からじっと話を聞いて励ましてくれた私の両親、王砥生・劉慶普と友人の菅沼安奈さんに感謝いたします。

参考文献

- [1] <http://atlas.kek.jp/sub/photos/ATLAS/PhotoATLAS.html>
- [2] I. Giomataris, *MICROMEGAS: results and prospects*, CEA/Saclay, DAPNIA, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex. France