

# CERN Summer Program Report

京都大学大学院 原子核ハドロン研究室

富田 夏希

natsuki@scphys.kyoto-u.ac.jp

2010年10月28日

CERNで毎年夏におこなわれている大学生向けサマープログラムに、日本からKEKのご支援により参加してきました。2010年6月28日から、9月4日にかけての10週間にわたる活動を報告いたします。

## 1 活動内容

### 1.1 研究課題

プログラムのメインである研究課題では、サマースチューデントがCERNの一つの研究室に配属となり、課題を与えられる。私はISOLDEと呼ばれる原子核の研究をおこなっているグループで固体物理の研究をしている、ポルトガル人の研究室に配属となった。

その研究室では、放出チャネリングと呼ばれる現象を用いて、結晶中での不純物の位置を調べる研究をおこなっており、私の課題は、その研究に新しく採用する検出器の、位置分解能の評価をおこなうことであった。

#### 1.1.1 放出チャネリング

チャネリングとは、放射線が結晶を通りぬける際、結晶原子のポテンシャルを受け、放射線が一定の方向にだけ通り抜けやすくなる現象をいう。中でも放射線を出す同位体を結晶中に埋め込み、放射線がチャネリングの効果を受けて出てくる場合を放出チャネリングと呼ぶ。図1は放射線が電子の場合の模式図である。四角が放射線源を表し、大きい丸が格子上の原子を、小さい丸が格子間を表している。左図の様に、放射線源が結晶の格子上にある場合は、結晶の格子方向に電子の強度が増し、右図の様に、放射線源が格子間にある場合は強度が下がるのである。

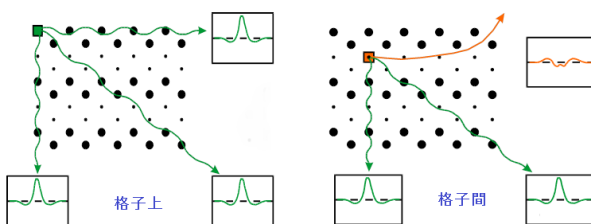


図1 電子の放出チャネリングの模式図  
左：放射線源が格子上にある場合 右：格子間にある場合

この効果により、半導体などの結晶中での不純物の位置を調べることができる。私の属した研究室では、ISOLDEのビームによって、調べたい不純物の同位体を結晶中に入れ、出てくる放射線の強度を検出器で調べている。

#### 1.1.2 検出器

私が扱うことになった検出器はTimePixと呼ばれる、シリコンピクセル検出器である。図2はフランジにとりつけられたTimePixの写真である。一つのピクセルのサイズは縦 $55\mu\text{m}$ ×横 $55\mu\text{m}$ ×奥行き $300\mu\text{m}$ で、全部で $512\times 512=262,144$ 個のピクセルから成り、位置だけでなくエネルギーも測れるようになっている。

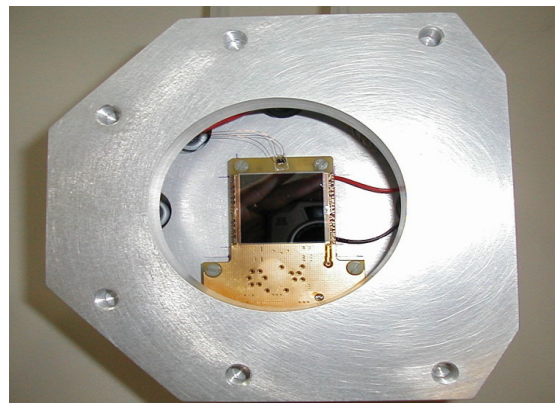


図2 TimePix

TimePixのシリコン部分のサイズは $2.8\text{cm}\times 2.8\text{cm}$ である。

現在研究室で使っている古い検出器のピクセルサイズは縦 $1200\mu\text{m}$ ×横 $1200\mu\text{m}$ であり、TimePixを使えば位置分解能を飛躍的に向上することができる。しかし、TimePixにはピクセルが小さすぎるが故の問題点がある。チャネリング放射を利用するような低エネルギーの電子は、一つのピクセルをヒットした後、検出器の中で散乱され、複数のピクセルをヒットしてしまうのである。そしてヒットされた複数のピクセルは、図3の様なクラスターを作る。TimePixは1秒ごとにヒットしたピクセルを記録するので、複数のヒットされたピクセルのうち、どれが最初にヒットされたピクセルなのか区別がつかない。私が担当教官から与えられた課題は、電子が散乱されてできたピクセルのクラスターの中から、最初にヒットしたピクセルを見つけることであった。

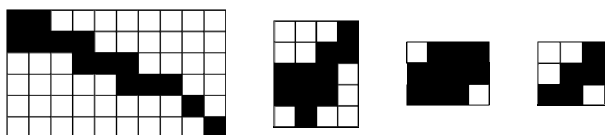


図3 ピクセルのクラスターの例

### 1.1.3 位置分解能

位置分解能は、ピクセルが反応する確率を  $P(x)$ 、平均の位置を  $\mu$  として、標準偏差

$$\sigma = \sqrt{\int P(x)(x - \mu)^2 dx}$$

で定義できる。

TimePix の場合、 $P(x)$  は、図4の様な階段関数となるので、代入してやると、一つのピクセルをヒットした場合の位置分解能は、 $\sigma = 16 \mu\text{m}$  と求まる。

同様に計算してやると、古い検出器の位置分解能は  $400 \mu\text{m}$ 、直径  $1\text{mm}$  の放射線源のビームの位置分解能は  $290 \mu\text{m}$  である。

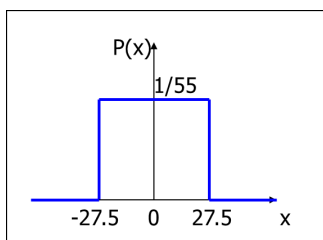


図4 TimePix の1ピクセルが反応する確率のグラフ  
中心を0と置いた。

### 1.1.4 プログラム

TimePix のデータの解析用に、研究室の博士課程の学生が作った、C++のプログラムが用意されていた。私はそれまでC++にあまり触れたことがなかったため、担当教官がバカンスへ行った最初の3週間はC++の勉強をし、数十個のファイルからなる解析用プログラムを読めるようになった。

私の解析用には、 $\text{SrTiO}_3$  の結晶中に  $^{89}\text{Sr}$  を埋め込んだ場合のデータが用意されていた。 $\text{SrTiO}_3$  中の Sr は図5のように立方構造をしている。 $^{89}\text{Sr}$  は Sr の同位体であるので、Sr の格子に埋め込まれる。よって  $^{89}\text{Sr} \rightarrow ^{89}\text{Y} + \beta^-$  ( $\tau = 50.53\text{days}$ ) の反応で出てくる  $\beta^-$  は、Sr の格子の方向から見ると強度が増す。図6が Sr の格子の方向から測定したデータをプログラムで解析したものである。中心で大きく強度が増しているのが分かる。また、今見ている方向以外でも格子の面に沿って電子が通り抜けやすいので、それぞれの格子の面に沿って  $45^\circ$  ずつ太い線が見え、さらにその間にも、次に通抜けやすい面による、細い線が見える。

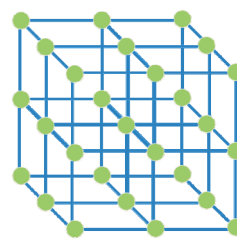


図5  $\text{SrTiO}_3$  中の Sr の結晶構造  
Sr は立方構造をしている。

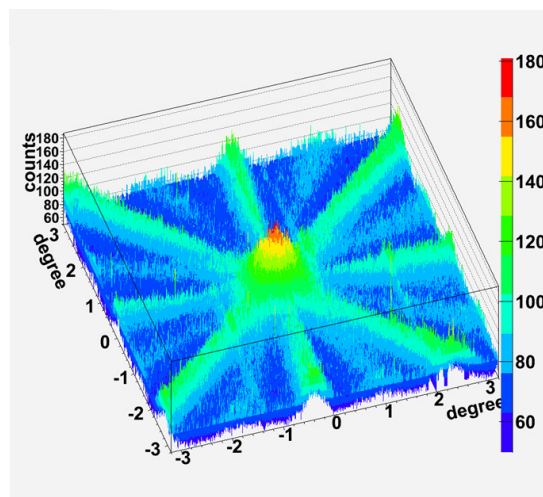


図6  $\text{SrTiO}_3$  中の  $^{89}\text{Sr}$  からの channeling  $\beta^-$   
図5を正面から見た場合に相当する。立方構造が見える。

### 1.1.5 課題

担当教官が帰ってきて、まず最初にヒットしたピクセルは図7の様にクラスターの中で端にあるピクセルだろうという考察のもと、端のピクセルを選び取れるようにプログラムの改良をした。さらに端として選んだピクセルの中からエネルギーが最大のもの、最小のもの、を選び取れるようにした。担当教官はこれでもうまいだろうと期待していたようだが、図8のように、この方法はうまくいかなかった。うまくいかなかった一番の原因としては、262,144個のピクセルの中で、反応しないピクセルが約2,000個あり、その反応しないピクセルを通った電子は、図9の様に別々のイベントだと判断され、反応しないピクセルの周りのピクセルが偽の端になってしまう点であった。

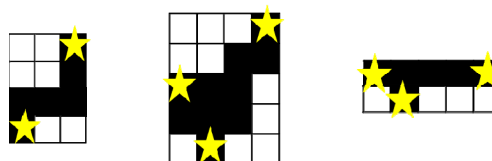


図7 クラスター中の“端”のピクセル  
の中からエネルギーが最大のもの、または最小のものを選ぶ。

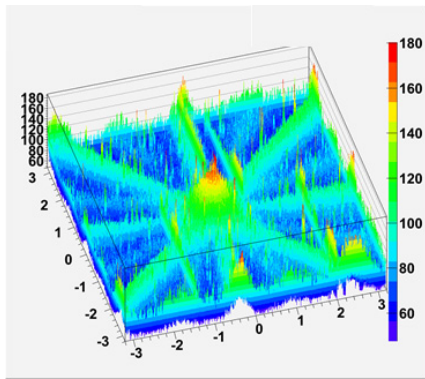


図8 クラスタ中で端のピクセルを選んだ場合の図  
反応しないピクセルのまわりでカウントが増えている。

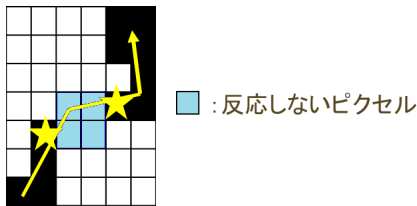


図9 反応しないピクセルによる問題  
の位置が偽の“端”だと判断されてしまう。

1.1.6 解析

担当教官の考えた方法がうまくいかなかったので、それからは自分で色々と考えて解析をしてみた。私の使ったプログラムでは、各ピクセルのキャリブレーション後のエネルギーの値は取り出せないような構造になっていたのだが、同じ研究室に配属された、TimePix のエネルギーキャリブレーションが課題のサマースチューデントが、キャリブレーション後のエネルギーのデータを取り出すプログラムを作ってくれ、クラスタの中のエネルギー分布を調べることができた。その結果、同じ形の小さいクラスタを比べると、図10の様に、小さいクラスタはエネルギー分布に規則性がなく、最初にヒットしたピクセルを見つけられないこと、また、図11のように、大きいクラスタでは多くのクラスタの端でエネルギー損失が大きいもの、損失が大きいところが最初にヒットしたピクセルなのか、最後にヒットしたピクセルなのかは、このデータだけでは分からない、ということが分かった。

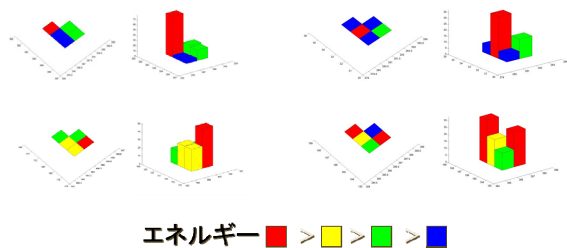


図10 同じ形の小さいクラスタ中でのエネルギー分布  
エネルギー分布に規則性がないことが分かる。

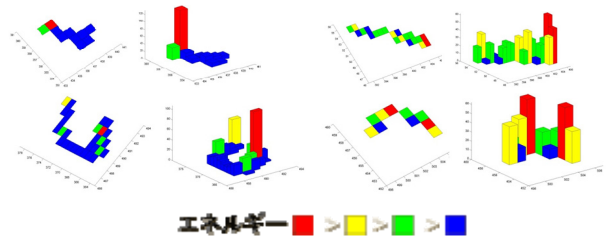


図11 大きいクラスタ中でのエネルギー分布  
約70%のクラスタは“端”でエネルギー損失が大きい。二つのクラスタがくっついて、一つのクラスタとして数えられている可能性もある。

次にクラスタサイズの分布を調べた。その結果、図12の様に、4個以上のピクセルからなるクラスタの数は指数関数的に減少していることが分かった。クラスタのサイズごとの割合を示したのが表1である。クラスタサイズの指数関数的減少は、まだ誰にも説明のつかない新発見だよ、と担当教官に言われ、嬉しかった。

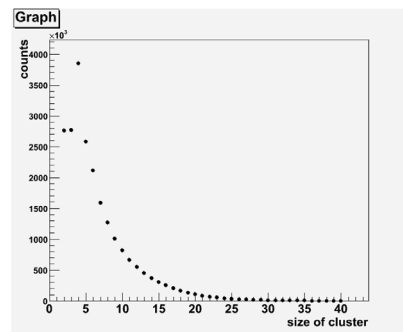


図12 クラスタサイズの分布  
指数関数的に減少している。

表1 クラスタサイズの割合  
信号を出し続ける壊れたピクセルがあるので、クラスタサイズが1のものは省いてある。

クラスタサイズ	割合
2 ~ 5	53.6%
2 ~ 10	84.0%
2 ~ 15	94.5%

最後にクラスタの幅の分布を調べた。図13の様にクラスタが10個のピクセルからできているといっても、縦、横の不確かさが55μm×10ある訳ではない。クラスタの幅を調べるプログラムを作り、分布を調べた結果が図14である。図14から、10個のピクセルからなるクラスタの幅の不確かさはおおよそ6ピクセル分以下であることが分かった。



図13 クラスタの幅  
どちらも10個のピクセルからなるクラスタ。

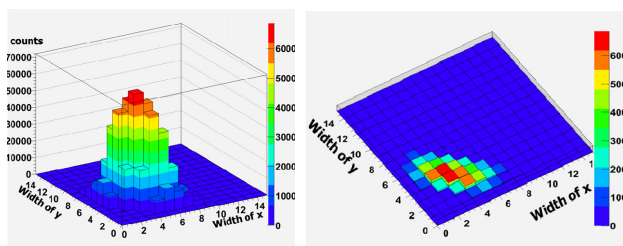


図 14 クラスターの幅の分布  
10 個のピクセルからなるクラスターの場合。

### 1.1.7 まとめ

以上の解析から、各クラスターサイズごとの最大の幅を求め、位置分解能を計算すると、TimePix の位置分解能は表 2 のように評価できることが分かった。

表 2 TimePix の位置分解能

小さいクラスターサイズのイベントだけを見れば、不純物のビームサイズや古い検出器の分解能に比べて、よい分解能が得られる。

クラスターサイズ	割合	最大幅	位置分解能
1	***	***	16 $\mu\text{m}$
2 ~ 5	53.6%	3 ピクセル	48 $\mu\text{m}$
2 ~ 10	84.0%	6 ピクセル	79 $\mu\text{m}$
2 ~ 15	94.5%	9 ピクセル	143 $\mu\text{m}$
放射線源のビームサイズ	***	***	290 $\mu\text{m}$
古い検出器	***	***	400 $\mu\text{m}$

この評価から、割合の少ない、大きいサイズのクラスターのデータを使わなければ、放射線源のビームサイズや古い検出器に比べて、十分よい分解能が得られることが分かった。

実際の研究で使われるであろう検出器で、今後の役に立つ評価ができたのはとてもいい経験になった。担当教官は私にもっと働いて欲しいようで、博士課程はぜひうちの研究室へおいでといわれ、とても嬉しかった。

### 1.1.8 発表

ISOLDE では毎週ミーティングがあり、サマースチューデントは滞在の最後の週に、自分の研究課題の成果を発表することになっていた。大勢の外国人研究者の前で、英語でうまくプレゼンテーションができたのはとても貴重な経験になった。しかし、用意してきたことはスラスラ喋ることができるが、発表後の質疑応答で、質問されている意味とそれに対して答えたいことが、頭の中では分かっているのに、うまく英語で表現できなかつたのが非常にもどかしかった。

## 1.2 授業

授業は 6 週間にわたり、検出器の話から標準模型を超えた理論まで、プレゼン形式でおこなわれた。

さすが LHC が稼動しだした年ということで、LHC 関連の話が多く、取れたてのほやほやの、 $W$  ボソンや  $t$  クォーク候補のデータなども出てきた。

また、何人もの先生が、自分もかつてはサマースチューデントで、プログラムに参加した夏は生涯でもっとも素晴らしい夏だったと言っていたのが、とても印象的であった。

## 1.3 ワークショップ

早い者勝ちで一つ選べるワークショップでは、私は CMS など使われている、シリコン検出器の開発をしている研究室のワークショップを選んだ。シリコン検出器といっても、研究室間で完全に研究の分担がされているヨーロッパとあって、ひたすらシリコンに欠陥ができないようにするというところだけを研究している研究室であった。参加者は私以外イギリス人で、英語についていくのに一苦労であったが、説明のあと、その場でデータを取って比較をしたりと、分かりやすく、非常に面白かった。

また後日、シリコン接着工場と呼ばれる、数十  $\mu\text{m}$  間隔の細いストリップ電極を持つシリコンセンサー同士を並べて、互いのストリップ間を細いワイヤーを用いてマイクロンの精度で接続(ワイヤーボンディング)するために建設された工場の見学を企画してくれた。実際にボンディングの機械が動くところを見せてもらい、興味深かった。

## 1.4 見学会

サマースチューデントチームが提供する実験施設の見学会は、本年度は ATLAS のエキシビジョンと SM18 というビームパイプのテスト工場、コンピューターセンターと LINAC であった。

どれも解説付きで面白かったが、LHC が稼動しているとあって、検出器までは見学できなかったのが残念であった。

## 2 生活

### 2.1 交流

プログラムには世界中の本当にたくさんの国々から学生が参加していた。それまで自分の中ではあまり基礎研究をしているイメージのなかった南アフリカやベトナムからも参加者がいて少し驚いた。地理で習う国というイメージだったバルト三国の友達もできた。ホステルのキッチンで集まって、手巻き寿司をごちそうしたり、逆に出身国の料理をふるまってもらったり、なんでもないので夜遅くまでしゃべったりと、色んな国の人が集まっているならでの、交流ができた。日本に帰国してからも、ネットを通じて交流を続けている。



## 2.2 語学

プログラムへの参加が決まってから、渡航するまでの数ヶ月は、英語のリスニング・スピーキング、それから CERN のあるジュネーブがフランス語圏ということで、学部のとときに第 2 外国語で学んでいたフランス語を勉強した。けれども実際渡航してからはほとんど役に立たず、授業も、食堂のレジのおばちゃんがフランス語で言う値段も、最後まで聞き取れないところがあった。

1 ヶ月が過ぎた頃は、自分の英語の上達のしなさに愕然としたが、7 週目のある日、英語・フランス語・ポルトガル語がペラペラな、同じ研究室のサマースチューデントが、「Did you went there?」と言っていたのを聞いてふっきれ、文法をあまり気にしないようにしたら、そこからあまりつまらずに話せるようになった。中学のテストだと 20 点くらいしか取れないような文法の英語だったかもしれないが、CERN の中で英語が母国語の人はほとんどおらず、お互い間違いに気づかないまま喋っていることも多く、文法にこだわりすぎず、思っていることをすぐ口に出せるようになるのも大事だと思った。

## 2.3 ホステル

ホステルは CERN のホステルの中で一番値段の安い、サンジェニのホステルであった。着いた日は、便座のないトイレや、なぜか部屋の中をはしる水道パイプの騒音、網戸がないため、寝ていると顔に飛んでくる得体の知れない虫などが気になって、こんなところで2ヶ月も暮らせるのか、と思ったが、2週間もすると慣れ、水道がうるさかろうと、虫が飛んでいようと、気にならなくなった。(トイレは違う階に便座があるのを発見した。)

## 2.4 食事

食事は CERN の食堂か、近くのスーパーで買ったものを食べた。最初はどれも新鮮で美味しかったが、1 ヶ月もすると飽きて、日本食が恋しくなった。何度か日本食の自炊も試みたが、食材が違うためか、ちっとも美味しく作れなかった。日本人のサマースチューデントと、日本食材の店で買った冷凍餃子や漬物など美味しい美味しいと食べたのはいい思い出である。

スイスならではとしては、スーパーで買ったチーズや 1 リットル 100 円の自動販売機の牛乳など、乳製品は安くてどれも美味しかった。一度奮発して食べに行ったチーズフォンデュもとっても美味しかった。

## 2.5 休日

全部で9回の週末があったが、せっかくスイスまで来て、部屋にこもっているのはもったいないということで、ほとんどの週末はどこかに出掛けた。

### 2.5.1 CERN 見学

3 日に分けて、CERN の施設をほとんどめぐった。滞在中 CERN から渡される ID カードで、ほとんどの建物に入ることができた。

最初に巡った CERN の第 2 のサイト、プレバッサン地区では、COMPASS 実験や、LHC のコントロールルームなどを見学した。COMPASS では、最初勝手に入っていいのか分からず、周りをウロウロしていたところ、シフトのおじちゃんが声を掛けてくれて、丁寧に実験の説明までしていただいた。また、LHC のコントロールルームでは、初めてビームが出たときに祝杯をあげたシャンパンの空瓶がたくさん飾ってあったのが印象的であった。また偶然に、ケネディ宇宙センターに運ばれる直前の、箱詰めされた AMS も見る事ができた。

CERN のメインサイト、メイラン地区では、自分の所属した ISOLDE をはじめ AD, n\_TOFなどを巡った。メイランでは今は使われていない加速器の跡などもあり、歴史を感じた。

LHC の四つの検出器も、半日かけて自転車で全部めぐった。場所が分からなかったので、Google の航空写真で CERN のサイトのものと同じ形の建物を探す、というなんとも原始的な方法で道を決めたが、迷うことはなかった。最初に行った LHCb で、重く閉ざされた敷地への扉が、自分の ID カードで開いたのにはちょっとした感動を覚えた。LHCb から CMS へは、途中の町で見つけたマクドナルドで休憩をはさみつつ、ひたすら坂道を登った。CMS ではこんなところまでわざわざよく来たねと言わんばかりに、コントロールルームのシフトのおじちゃんが記念写真まで取ってくれた。CMS から ALICE までは下り坂で、とても気持ちがよかった。よく晴れた日で、途中の開けた道ではモンブランやジュネーブ名物のジェットまで見渡せ、とてもよいサイクリング日和であった。どこも検出器は見ることができなかったが、コントロールルームやエキシビションなどを見ることができて、とても楽しかった(図 15)。



図 15 ヒマワリ畑に浮かぶ CMS の建物とモンブラン

## 2.5.2 観光

スイスの鉄道半額パスを購入し、観光にもたくさん出掛けた。時に日本人のサマースチューデント同士で、時にロシア人と、時にトルコ人と、時には一人で出掛けた。ジュネーブ、ローザンヌ、エビアン、モントルー、ベルン、インターラーケン、ルツェルン、チューリヒ、ツェルマット、シャモニ・モンブラン、イタリアのミラノなど、電車で行けるおもな街はめぐったように思う。

中でも1泊2日で行ったツェルマットはとて素晴らしいところで、2日ともよく晴れ、マッターホルンや氷河などを拝むことができた(図16)。また、ミラノへ行く際は、イタリア人のサマースチューデントが、予約の困難な絵画、最後の晩餐の見学の予約をしてくれて、運よく見学することができた。



図16 ツェルマットにて、さかさマッターホルンとともに

## 3 プログラムで感じたことなど

### 3.1 配属先について

CERNに応募する際は、せっかくLHCが動き出したということで、LHC関係の課題研究を希望しましたが、残念ながら叶いませんでした。けれども、自分で検出器を巡ったり、食堂に出ているLHCのコンディションモニターを毎日見たりして、LHCの動いているCERNの雰囲気を十分味わうことができました。

また、大きな実験に配属されると、解析のほんの一部にしか関われないこともあります。規模の小さい実験に配属になったおかげで、解析すべてに関わることができ、また今後その研究室において、実際に役に立つ研究に関われたので、その点においてとてもよかったと思います。

## 3.2 女性研究者の環境

CERNには日本よりはるかに多くの女性研究者がいました。CERNの敷地内には保育園があり、昼休みには食堂に用意されている子供連れのコーナーで、両親揃って子供と食事をとっている姿も多く見られ、非常に恵まれた環境だなと感じました。また夕方6時頃にはみんな仕事を切り上げて帰るといった文化も、育児をするにはうってつけで羨ましく思いました。

## 3.3 今後のプログラムについて

CERNのサマープログラムは非常に優れたプログラムだと思います。そしてプログラムで経験したことは、間違いなくスイスまで来ないことにはできなかったことだと思います。予算の確保が難しい状況ではあると思いますが、滞在期間を短くしてでも、なるべく多くの学生を今後も派遣し続けていただければと思います。

また、行きの飛行機がプログラムの始まる前日の夜到着の便でしたが、可能であれば、他のヨーロッパからの参加者の様に、1日以上前に到着の便にさせていただけたらと思います。ヨーロッパは夜にあまりお店がやっていないので、生活用品や食料を自分で用意しなければならないサンジャンニのホステルでは、着いた翌日のプログラム初日の手続きがすべて終わるまで、自分で食料などを手に入れることができませんでした。

## 4 おわりに

10週間にわたり、本当に貴重な経験をさせていただきました。CERNの環境も周りの仲間も、このサマープログラムでしか味わえないとても素晴らしいものでした。研究においても、語学においても、生活においても、それぞれ本当に多くのことを吸収できました。帰る際にはCERNを離れるのが非常に名残惜しく、また将来、CERNに帰ってこられるような研究者になろうと思いました。

最後になりましたが、このような素晴らしいプログラムに日本から参加できるよう、尽力してくださっている先生方並びにKEKの皆様、本当にありがとうございます。また、滞在中は駐在の福田さんを始め、日本アトラスグループのみなさん、東大早野研のみなさんに大変お世話になりました。ありがとうございました。

このサマープログラムで経験したことを、今後少しでも日本の物理業界へ還元していけたらと思います。