

Summer Student 体験記

東京大学大学院 理学系研究科物理学専攻 浅井研究室

佐々木 雄一

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

2009年(平成21年)10月25日

2009年6月29日から、2009年9月5日までの10週間、CERN Summer Studentsの一員としてCERNの仕事の一部を体験することが出来た。ここでは、その活動内容および、生活での体験について述べる。

1. はじまり

このプログラムの存在は、素粒子センターの先輩方から聞かされて前々から知っていた。去年は同じ研究室の石田さんが Summer Student として CERN へ出かけていったのを見送った記憶がある。一年が過ぎるのは早いもので、いつの間にか今度は自分たちの番になっていた。とはいえ、この一年で英語が上達したわけでもなし、なにか技術を身につけたわけでもなしで、Summer Student として選ばれたときは嬉しさ半分、不安半分だったのを覚えている。兎にも角にも問題は英語だろうと思い、とりあえず、BBCのラジオなどを聞いて英語のリスニングの勉強をしてみたが、その時点では8割方理解できていた。これならきっと大丈夫だろうと思い飛行機に乗り込んだのが6月29日。キャビンアテンダントのお姉さんはオランダ人だったので英語で話しかけられるわけだが、機内食を下げるとき一体どういうはずみか、「おいしかった？日本食はおいしいわよね。でもオランダの食事もおいしいのよ。私たちはお互いに文化を学びあって、高めていかなくてはいけないのよ。」と問わず語りされ、困惑した。そもそも英語を聞き取るのに精一杯だったのがまず一つ不安にさせられたし、日本人は絶対にしないような話題を突然振ってくるという文化の違いに驚いたのだ。考えてみればこの旅では、英語を学ぶこと以上に、世界各国からやってくる Summer Students の文化を学ぶことが、コミュニケーションを取る上で大切である。その前途を思うと、また一つ不安が増えるのだった。

2. 講義

Summer Student Program でわれわれに課せられる課題は大きく二つあって、一つは実験グループに配属されて行う研究と、もう一つは午前中に開催される lecture の聴講である。この lecture では、エレクトロニクス専攻の学生を想定したやさしい物理入門から始まり、検出器の概論、加速

器の概論、宇宙論、エレクトロニクス、大規模コンピューティング、解析プログラムの使い方等々、ありとあらゆる実験知識を学びつつ、最終的に標準模型を修め、さらにそれを超えた物理(余剰次元モデル等々)の紹介まで行う、非常に完成度の高い講義群であった。もちろんこのあたりは一通り大学で学んではいたのだが、その実践的な復習という意味で非常に有意義なものだった。外国人が行う講義を受けたのは実はこれが初めてなのだが、その完成度にはいつも感動させられた。必ず話が一時間の講義時間の中で閉じるように作ってあったし、退屈させないように定期的にジョークも挟んである(もっとも彼らのジョークはパンチラインで早口になるので聞き取れないし、聞き取れたときもさっぱり面白いと思えないので、私は愛想笑いだった)。その中でも特に印象に残ったのは三つあって、まず一つ目はニュートリノについてのフランス人の講義である。このフランス人の講師はどうも日本があまり好きではないようで、極力日本の研究成果を紹介しないように話をしていった印象がある。しかしそれでも、話の後半になるとニュートリノ実験のマイルストーンとして、カミオカンデ、T2K、KamLAND などの話を入れなくてはならず、実に講義時間の七割がその紹介に使われたのは、日本人としてはとても嬉しかった。それとともに、日本のお家芸とよく呼ばれているニュートリノ物理が、内輪での呼び名でなく、本当に世界に誇れるものなのだ知って、改めてニュートリノ物理への興味が沸いた。

二つ目は IPMU の村山先生による標準理論の講義で、これは実に五時間にわたって、電磁力、弱い力、強い力までを一通り、そして丁寧に解説したものである。日本にいてもなかなかお会いする機会のない村山先生の講義を受けられること自体が嬉しかったし、内容も標準理論ということで、復習半分、新しい話題半分という具合で非常に勉強になった。新しい話題が提起されたとき、夕食は大体ベトナム系ドイツ人や中国人の友達とそれについて議論をして過ごすことになる。それぞれ思うところがあるのでなかなか結論はまとまらないのだが、それも含めてよい経験になったし、非常に楽しい時間であった。この講義は同僚のポーランド人(エレクトロニクス専攻なので物理はまったく知らない)の琴線にも触れたらしく(彼曰く「最高にエキサイティ

ングだった」とのこと),これ以後,昼食後研究室に行くとき,彼が講義のスライドを開いて,「雄一,これはどういふことなんだい?」と質問してくることが日課になった。英語で物理の微妙な概念を教えるのは非常に難しく,たとえば,「反応断面積がエネルギーの関数になる」ということ一つとっても,なかなか理解してもらえなかったのを覚えている。日本語でも,物理を学んでいない人にこれを教えるのは難しいのに,英語だと上手い言葉が見つからなくてなおさら大変になる。しかし,食後の休憩としては最適な時間のつぶし方だったし,お互いに得るものは多かったと思う。

印象的な講義の三つ目は,デバリによる“Beyond the Standard Model”である。この講義では,なによりもデバリの人柄に圧倒された。言葉は悪いが,「物理狂」という表現がぴったり来る。小説でしか見たことがないような,物理に狂った人である。スタイルも独特で,事前にスライドを用意するのではなく,OHPに透明なシートを映し,そこに直接マジックで絵や式を描き説明してゆく。一度勢い余ってOHPのステージに直接マジックで書き込みをしてしまったときがあって,この人は本物だと感動した。内容は,余剰次元に,新しいゲージボソンの話等々非常に面白いものだった。

以上の講義は,午前中三つ,おのおの一時間のペースで進められた。その後,三十分間の質疑応答時間があった, Summer Students の質問に講師の方々答えてくれる。印象に残ったのは東南アジアの学生の熱心さで,おそらく相当考え抜いたであろう物理の核心を突く質問を,しばしばしていた。幸いにも,彼らとは友達になれたので今後も連絡を取り合って切磋琢磨していきたいと思う。

3. 仕事

昼食が終わると,仕事場へと移動する。私が配属されたのは,TOTEM という実験グループで,最高重心系エネルギー14TeVのパワーを誇るLHCにおいて,陽子陽子衝突の断面積を正確に測定することを目的とした実験を行っている。図1に現在まで測定されている陽子陽子衝突の全断面積を示す。これを見るとまず $\sqrt{s} = 1.8 \text{ TeV}$ における二つの測定結果が有意に(2.6 σ)ずれている。また,それより高エネルギー側のデータは,宇宙線の測定によって求められたものであるため不定性が大きい。TOTEMでは,このエネルギー領域における陽子陽子散乱断面積を高い精度(図1の右下に,TOTEMで期待されているエラーの大きさが表示されている)で測定する。

TOTEMの売りの一つに,光学定理を使って,ルミノシティ非依存で全断面積を出せることが挙げられる。全断面積を出す式は,

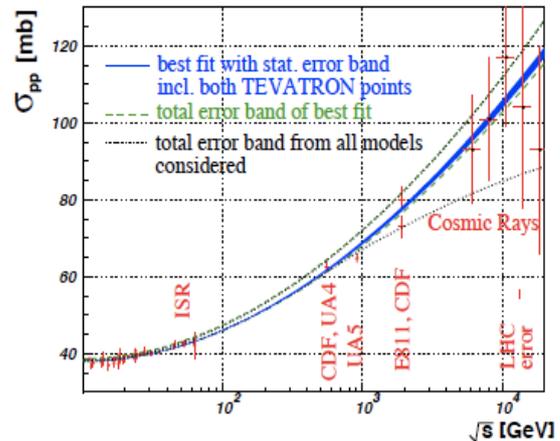


図1 陽子陽子衝突の全断面積[1]

$$\sigma_{tot} = \frac{16\pi}{1 + \rho^2} \frac{dN_{el}}{dt} \Big|_{t=0}$$

と書ける[1]。ρは理論から予測される値で小さな値が来るので不定性は小さい。N_{el}, N_{inel}はそれぞれ弾性散乱の数,非弾性散乱の数であり,tは横方向運動量移行を示している。この時の主要項は,

$$\frac{dN_{el}}{dt} \Big|_{t=0}$$

である。これを正確に測定することが,TOTEM実験の最重要課題である。そのため,TOTEMではCMSの衝突点IP5から147m,220mの地点にRoman potと呼ばれる検出器を置いて,散乱された陽子を測定している。この時のtは,最小で10⁻³GeV²程度であり,ここからt=0極限での値を外挿して求めてやることになる(図2)。

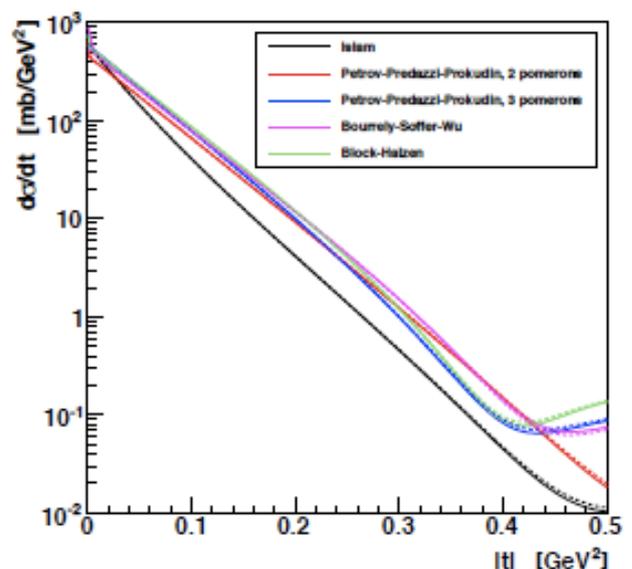


図2 モデルごとの微分散乱断面積(14TeV時)[1]
どのモデルにせよ指数関数的に落ちてゆく傾向は変わらないので, dN / dt(t=0)の外挿による不定性は1%以下である。

先に述べた Roman pot は図 3 のような edgeless silicon detector を用いた検出器であり、ビームの広がり幅の 10 倍に相当する 8mm 程度まで近づいて、散乱された陽子を検出することが出来る。

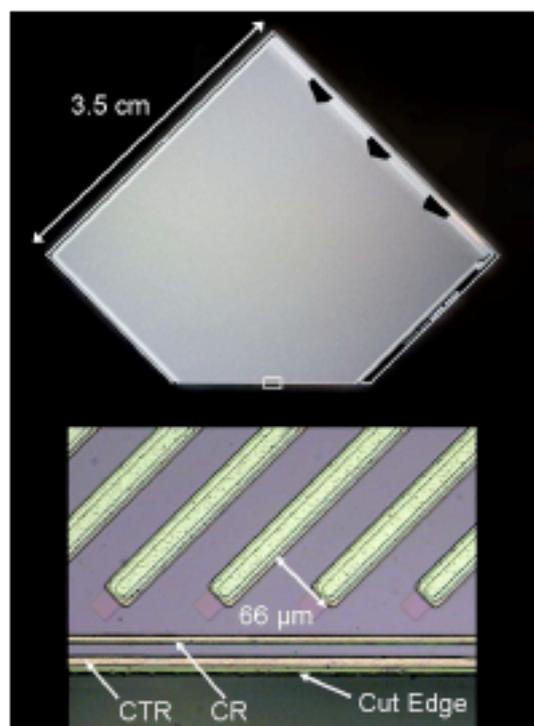


図 3 Edgeless silicon detector[1]

ここから出たアナログデータは、次に VFAT と呼ばれるチップでデジタイズされ、続いてそのデータを元に、Level 1 Trigger が作られる(以下、L1T と略す)。ATLAS などと異なり、TOTEM のトリガはこれだけである。これらデジタルデータは、その後光ファイバーを通してコントロールルームへ送られる。そこで、TOTEM FED(Front End Controller)によって光信号から電気信号へと戻され、後に解析に必要なヘッダーなどを付加され、VME から読み出される。この部分が、私が TOTEM エレキグループで担当した箇所である。図 4 に、TOTEM FED のブロックダイアグラムを示す。

私に課せられた課題は二つあって、一つ目は LocalBus の通信速度の向上、二つ目は bunch crossing/event counter の製作であった。

LocalBus とは、TOTEM FED の上に載せられている五つの FPGA を相互に接続しているバスであり、32bits のデータラインに加え、アドレスライン、output enable ライン、write/read select ライン、チップセレクトラインが用意されている。しかしこれらはすべてマスターである VME64x interface チップからしか駆動できないようパツファを噛ました設計で、つまり、スレーブ側から acknowledge シグナルを送れるようにはなっていない。そのため、スレーブの

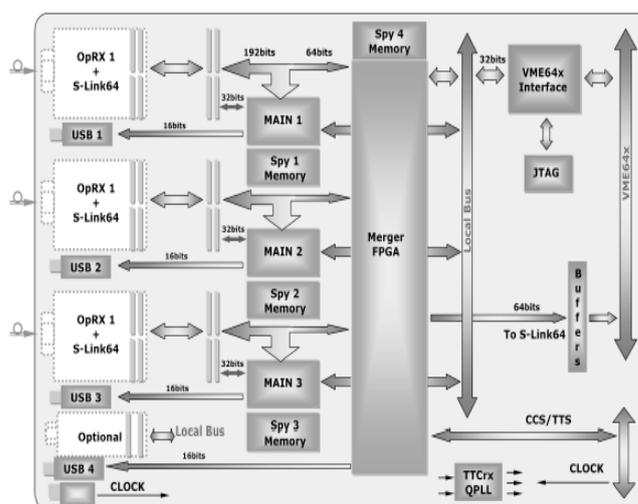


図 4 TOTEM FED のブロックダイアグラム[1]

チップがデータをきちんと準備する・受け取るとを保証するため、300ns という比較的長い時間待ち受け状態を取っている。しかしこのサイクルだと、現状の TOTEM の data acknowledge rate は達成できるが、この先リミノシティを上げた場合は追いつかなくなることが予想される。そこで、この部分の改良がまず課題として課せられた。そもそもどうしてこのような冗長性のない設計になっていたのかスーパーバイザーに尋ねてみたところ、「政治的な問題だ」とのことで、それ以上詮索は出来なかった。私がやることは簡単で、回路図の中から使っていない信号線を一本見つけて、それに acknowledge signal を割り当て、state machine を少し書き換えればよいだけの話なのだが、そんな線がはじめから余っていたら苦労はしない。すでに各線には何らかの信号が割り当てられていて、それを譲ってもらうには、他の開発者にそのようにお願いをしなくては行けない。しかしなにぶん CERN は夏休みの真っ最中で、しかも TOTEM エレキグループはイタリア人が主な構成員なので、ほとんどの人が休暇に行ってしまう、長期間連絡がつかない状態が続いた。そうこうしているうちに、ポーランドから先述の Summer Student がやってきた。彼はエレクトロニクス専攻のエキスパートだということで、しばらく一緒にこの問題に当たることになったが、他の開発者に連絡がつかないのは相変わらずなので、彼にしても特に出来ることはなかった。一方で、Summer Student としての限られた時間を有効に使うため、私はスーパーバイザーに相談して、新しい課題を割り振ってもらった。それが二つ目の、bunch crossing/event counter の実装である。

LHC のパイプの中を通るビームは、短い「パンチ」という単位に区切られている。そのパンチが 27km の間に 3564 個連なっているのだが、それらのパンチには一つ一つにインデックスが付いている。そのインデックスを収納するのが 12bits の bunch crossing counter であり、実際にはすでに

TTCrx というチップによって TOTEM FED 上に実装されている。同様に、event counter というのは LIT をカウントする 24bit カウンタで、こちらもやはり TOTEM FED 上に実装されている。しかし問題はそこからで、たとえば図 4 中の MAIN チップには、その情報を受け取るのに十分な本数のライン (28 bits 分必要) が接続されていない。そこでその部分に関しては、自分の手でカウンタを作ってやることで、4 bits 分しか確保されていないラインを通して、bunch crossing/event counter を実装した。図 6, 7 に、4bit 版 module と、28 bit 版 module のブロックダイアグラムを示す。

4 bit 版に関しては、タイミングの不調によるカウントミスを防ぐため、多少技巧的なことを行っているが、基本的には単なるカウンタである。28 bit 版はさらに簡単で、TTCrx が送り出すカウントを、ストロブに同期して FIFO に格納するだけなのだが、チップごとにタイミングの差が生じるようなので、PLL の位相を書き換えることでデータを読み取るタイミングを可変に出来るようにしてある。

これらを製作した後、実際に TOTEM FED ボードに焼き込んで、デバッグも行った。しかし、デバッグ用のシグナルを作るプログラムもベータ版で、そのバグに嵌って一週間を無駄にしてしまったし、その次には、TOTEM FED と

クロックを作るボードとの接続が電氣的に非常に不安定になっていて、でたらめな動作をしているように見えて途方に暮れたり、なかなか一筋縄にはいかなかった。他にも数えればキリがないほどの問題にぶち当たって時間がどんどん過ぎていったが、それぞれきちんと担当者にフィードバックして修正してもらった約束をとりつけたので、無駄な時間ではなかったと思う。

モジュールの最終テストを行えたのは、実に日本に帰る前々日のことである。想定されるいくつかのシチュエーションで、それぞれ一万回の動作を行い、正しく動作していることを確認した(たった一万回しか行えなかったのは、デバッグ用のプログラムがそのようなテストに対応しておらず、毎度 100 個程度のデータを手で読み出さなくてはいけなかったからである。この点については、スーパーバイザーへの最後の引き継ぎの際に指摘して、後にもっと本格的な確認をしてもらうことにした)。

ちなみに、相方のポーランド人は、私が帰国する二週間ほど前から LocalBus の本格的な開発に着手して、最終的には現状の通信速度の約 2 倍に相当する、目標を十分に上回る速度を達成していた。すごい奴だと思う。

4. 生活

仕事は毎日せいぜい六時半くらいまでで、その後はレストランでビールを飲みながら夕ご飯を食べるのが流れになっていた。すると同じく仕事を終えた友達が集まってきて、ぐだぐだするのが日課となった。大体ご飯を食べる時間が決まっていたので、ドイツ人や中国人や、メキシコ人やらのうち、割と決まったメンバーで食べていた。運よく彼らは物理の学生 (Summer Students の 6 割, 7 割くらいはエレクトロニクスの学生なので、物理の学生というのはむしろ少数派である) だったので、基本的には物理の話をしつつ、しかし自分の国の話もしながら盛り上がった。面白かったのは、Google street view で日本の大学案内をしてあげたことである。私にとっては日本の見慣れた風景に過ぎないが、彼らにとってはやはり物珍しいものようで、みんなで大騒ぎしながら見ていた。インターネット発祥の地である CERN でその恩恵にあずかれるというのは、本当に面白いことだと思った。

休みの日には、メキシコ人や中国人の友達と一緒に電車旅行に出かけた。いろいろなところに行ったが、一番印象に残ったのはスイスの首都ベルンの街を郊外から眺めた風景で、街をグルッと取り囲むように流れる青い川と草木の緑、それに深い歴史を刻んだ赤レンガのコントラストが最高に綺麗だった。

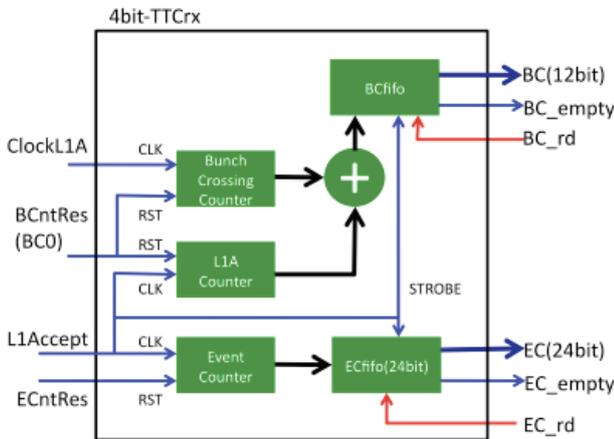


図 6 4 bit 版モジュール

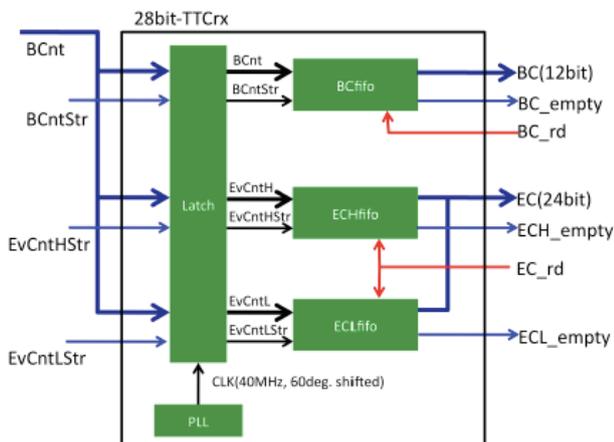


図 7 28 bit 版モジュール

シヨン城もとても面白かった。兎にも角にも歴史が古い。増築を重ねてかれこれ数百年の単位で使われ続けてきたお城ということだったが、その途中何度戦場となったことだろうか。さらには刑務所や拷問室として使われていたこともあるわけで、そんな場所が今観光地になって、私がそこに立っているかと思うと、とても不思議な気持ちでした。

しかしわざわざ観光名所に行かなくてもそこらへんにいくらでも面白い風景が広がっているのがスイスのすばらしいところで、ジュネーブ旧市街などは暇なときに一人で散歩によく出かけていた。CERN から西に行けばすぐに長閑な田園風景が広がるし、その先にはジュラ山脈がそびえ立つ。これほど風光明媚な土地もそうはないだろうと、到着した直後は感動しきりだったが、人間の悪い癖で、すぐに慣れてしまった。反対に、日本の桜が好きだというクロアチア人の女の子に桜の美しさを説明したり、紅葉も同じようにすばらしいのだと語ったりしていたら、自分がいかに日本のそういう風景を見逃しながら生活しているかを実感させられた。外国に出かけることで初めて見える日本のよさというのも皮肉な話だが、悲しいかな真実だと思う。

一週間に一二度のペースで、ビアパーティが開かれた。お酒を飲むとどうせみんな適当な言葉で話し始めるので、恥を捨てて英語を練習するよい機会になった。写真1は、夕ご飯仲間として先ほどから何度か登場しているメキシコ人のダニエルとの写真である。彼と知り合ったのも、ビアパーティの時だった。付き合いのよい友達で、今でもたまにスカイプで話をしたりする仲である。

さすがCERN だと思ったのは、ワインバーグの講演会が開かれてノーベル賞受賞者の話を聞くことが出来たり、なんの前触れもなく、やはりノーベル賞受賞者のグラウバーがTOTEMのバラックを訪ねてきたりしたことである。レストランにも本を出しているような有名な物理学者がたくさんいて、ミーハーな私にはとても楽しい環境だった。しかしミーハー具合で言えば、ヨーロッパ人は日本人に負けず劣らずミーハー揃いだったと思う。それに加えて、物腰、



写真1 メキシコ人ダニエル(左)と私(右)

ものの考え方、捉え方がどことなく日本人に似通っていた気がする。一番感覚が違うのはアメリカ人と中国人で、彼らは絵に描いたように自由奔放な性格だった。

イタリア人のミーティングにも何度か参加したが、これもなかなかおもしろい。まず、本当にミーティングが時間通りに始まらない。イタリア人が時間にルーズだというのは知っていたけれども、ここまでとは思っていなかった。それに彼ら是一对一で話をする時以外は、人の話を聞かない。もともと自分の思うところがあるようで、そこから意見を変えるのを嫌がる。初めのうちはそういうお国柄の違いに困惑して胃が痛い毎日を送っていたが、それも慣れてしまえばどうということではなくて、むしろ視野が広がるよい機会だったと思う。また、一度そういうものだと思ってしまえば、逆にその文化の違いを楽しむ余裕が出来て、新しい国の友達を作るモチベーションにもなった。

5. まとめ

この Summer Student Program で学べたものは、もちろん技術的なこともそうだが、それ以上に、他の国の学生たちとどうでもいい与太話から物理の話まで、幅広い話題で議論できた経験だと思う。あとそれぞれのお国柄を知るよい機会にもなった。そういう意味で、成田発の飛行機の機内で感じた不安は、よい方向に解決されたと思う。

私がCERNを離れる時期は比較的遅かったので、多くの Summer Students の帰国に際し、お別れを言った。そのとき、「そのうちストックホルムで会おう」と言うのがお互いの決まり文句になっていた。それはさすがにジョークとしても、少なくともその目標に向かって努力して行きたいと思う。幸い、彼らのほとんどとは連絡可能な状態にあるので、近況を伝えあって、切磋琢磨出来ればと思う。

最後になりましたが、今回お世話になった方々、KEKの徳宿先生、岩見さん、石川さん、福田さん、推薦書を書いていただいた浅井先生、私が日本にいない間実験の世話をしていただいた東京大学素粒子センターのみなさん、CERNの方々、そして Summer Students のみなさん、ありがとうございました。今後ともこのすばらしい企画が続いていくことを、こころからお祈りしております。

参考文献

- [1] “The TOTEM Experiment at the CERN Large Hadron Collider”
<http://www.iop.org/EJ/abstract/1748-0221/3/08/S08007>