

CERN Summer Student Programme 2011

名古屋大学大学院 理学研究科

山内 克弥

katsuya@hepl.phys.nagoya-u.ac.jp

2011年10月28日

1 はじめに

今回、私は CERN Summer Student Programme に 7 月 5 日から 9 月 9 日の 10 週間参加しました。このプログラムは CERN で行われており、世界中から毎年 250 名程の学生が参加しています。本プログラムにおける活動内容・体験についてこの場をお借りして報告いたします。

2 活動内容

2.1 講義・見学

7月6日から8月12日までの間、毎朝講義がありました。内容は、素粒子標準模型の基礎、測定技術、コンピューティングまで様々な内容の英語での講義でした。最先端の技術や、現在計画中の実験に関する講義が印象に残りました。なかでもミューオン加速器の話が興味深かったです。ミューオンは電子と比べ制動放射によるエネルギーロスが小さいので、TeV スケールでのレプトン-レプトン衝突型円形加速器が可能になるという話には興奮しました。講義の後には 30 分程度の質疑応答の時間が設けられていました。この時間中に英語で質問してみたのですが、なかなか質問の意図を伝えられず苦労しました。しかし、そんな質問にも親身に分かりやすく答えてくれたので、助かりました。

見学では、CMS・ATLAS の施設などを見ました。CMS の見学では実際に地下まで降りることができました。地下まで降りてみると実験のスケールの大きさを肌で感じ取ることができました。施設見学の際に、ところどころで KEK と書かれた装置などを目撃することもあり、LHC への日本の貢献を感じることができました。

2.2 研究

Summer Student Programme の参加者は各々研究室に配属され各自研究を行います。これがメインの活動となります。私は CMS 実験における長寿命粒子探索グループに加わり、指導教官 Steve 氏のもとで magnetic monopole 探索を行いました。以下にこの研究成果について報告します。

2.2.1 Magnetic Monopole

Magnetic monopole (以下 monopole) は単磁荷の粒子で、1931 年に Dirac が電荷の量子化を説明するために導入した考えです。モデル依存性はあるが、370 GeV 以下の質量の monopole は CDF の実験により制限がかかっています。

電荷 e と磁荷 g の関係は次のように表されます。

$$eg = \frac{n\hbar c}{2}$$

n は整数で $n = 1, 2, 3, \dots$ をとります。磁荷は $g = ng_D = 68.5ne$ です。また、 $n = 1$ の時、 $g = 4.136 \times 10^{-15} \text{ Wb}$ となります。古典的な monopole には質量の理論値はないのですが、半径 r_g が電子の古典半径 r_e に等しいと仮定すると次のように見積もることが出来ます。

$$r_e = r_g = \frac{g^2}{m_g c^2} = \frac{e^2}{m_e c^2}$$

$$m_g = \frac{g^2 m_e}{e^2} \simeq 2.42 \text{ GeV}/c^2$$

ただし、これは素電荷を e 、 $n = 1$ とした計算であるので、 $n > 1$ がクォークの電荷が e より小さいこと考慮すると、質量 m_g はさらに大きいと予想することができます。

Monopole は他の知られている荷電粒子と異なる面白い特徴があります。第一に、大きなエネルギー損失があげられます。検出器中を通過する際、monopole は約 $68.5e$ の電荷を持った粒子のようにエネルギーを落とします。これから Bethe-Bloch を用いてエネルギー損失を予測すると図 1 のようになり、他の荷電粒子と比べ大きなエネルギー損失を持つことが分かります。

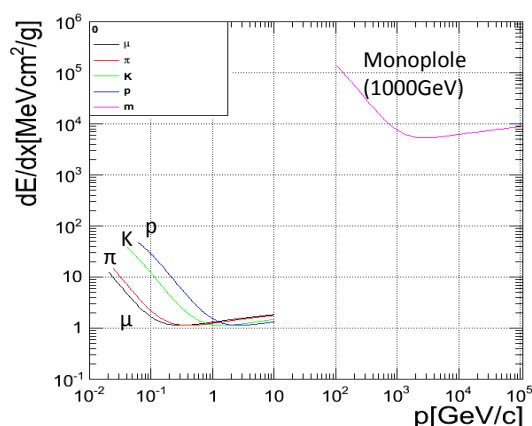


図 1. 粒子毎のエネルギー損失の比較

第二に、monopole の磁場中での運動は、荷電粒子と異なります。CMS 検出器において荷電粒子は磁場中ではローレンツ力を受け、磁場に垂直な方向に曲げられます。それに対して monopole は磁場に沿った方向に曲げられます。また、質量が大きい monopole は他の粒子と比べて速度が遅く、1000 GeV の monopole が生成された際の速度は光速の $1/2$

程度となります。一方、ミューオンなどはほぼ光速で測定器内を通過します。Monopoleがこのカロリメータに到達する時間は他の粒子に比べ数 ns 遅れることが予測できます。

2.2.2 CMS 検出器

CMS(compact muon solenoid)検出器はLHC実験における汎用検出器です(図2)。大きさは、高さ14.6m、長さ21.6mであり、内側から内部飛跡検出器、電磁カロリメータ、ハドロンカロリメータ、超伝導ソレノイド電磁石、ミューオン検出器という構造になっています。この検出器の特徴の一つはソレノイド電磁石です。大きさは、高さ6m、長さ13m、磁束密度は4Tです。Monopoleがカロリメータに対して垂直に飛び出すことを仮定した場合、磁場に沿った方向へ30cmほど曲げられることとなります。このソレノイドはカロリメータの外側に設置されています。そのためソレノイドの影響を受けずにエネルギーを測定することが出来ます。電磁カロリメータは放射長0.89cmのPb(WO₄)₄結晶から構成されています。結晶の大きさは長さ230mm(25.8X₀)、表面積2.2cm×2.2cmです。また、ビーム軸から電磁カロリメータまでの距離は1.3mです。

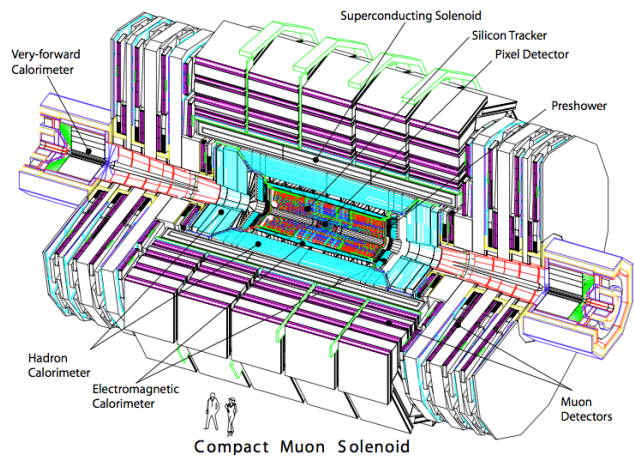
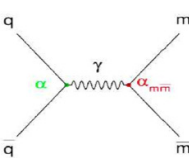


図2. CMS 検出器

2.2.3 Monopoleシミュレーション

Monopole生成過程はDrell-Yan過程として考えます。この際のFeynman図は左のようになります。Drell-Yan過程の生成断面積は次のように表されます。



$$\sigma(qq \rightarrow \ell^+ \ell^-) = \frac{Q^2}{3} \times \frac{4\pi\alpha^2}{3E_{cm}^2}$$

Qはクォークの電荷です。Q²を3で割るのはクォークのカラー自由度を考慮しているためです。この式とmonopoleの結合定数がα_{mm} = ng_D / e = 68.5αであることを用いて、

$$\sigma(qq \rightarrow m\bar{m}) = \left(\frac{ng_D}{e}\right)^2 \times \sigma(qq \rightarrow \ell^+ \ell^-)$$

となります。過去の実験結果からのp-p衝突でのDrell-Yan過程の反応断面積をmonopoleに対して用いると、

$$\sigma(qq \rightarrow m\bar{m}) = (68.5)^2 \times \frac{1.74}{s} \times e^{-\frac{25.3m}{\sqrt{s}}} \times 10^{-30}$$

となります。ここでm = 2M_m (M_mはmonopoleの質量)です。以上の過程に基づきmonopoleを生成しました。今回300 GeV, 500 GeV, 700 GeV, 1000 GeVのmonopoleを各々1,000 events生成しました。このシミュレーションより得られたmonopoleの典型的な信号を図3に示します。通常の荷電粒子はy-z平面上で曲げられないと仮定しているので、飛跡は直線として再構成されます。この結果、飛跡とカロリメータでの検出点はズレます。また、monopoleはカロリメータに大きなエネルギー損失を残すことも分かります。

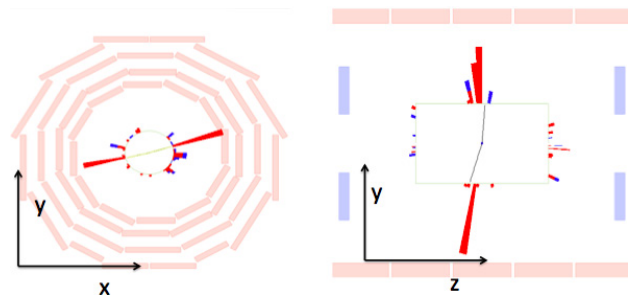


図3. イベントディスプレイ

2.2.4 解析結果

今回の解析では、トリガーから要請されるカロリメータでのエネルギー損失98 GeV以上、光子と比較した電磁カロリメータへの到達時間(etime) > 1 ns, 2 ns, 3 nsを事象選別に用いています。生成断面積は次式で求めることができます。

$$\sigma = \frac{\text{event数}}{\mathcal{L} \cdot A \cdot Br}$$

ここで、Lはルミノシティ、Aは検出効率、Brは崩壊分岐比を表します。今回はBr = 1を仮定しています。1事象検出した時の生成断面積を見積もり、図4のような結果を得ました。今回の結果から、到達時間による事象選別後も信号に対する感度があるという結果を得ました。

この先、グループとしては、背景事象を見積もり、到達時間による事象選別の有効性を示し、実際のデータを用いて解析を進める予定です。

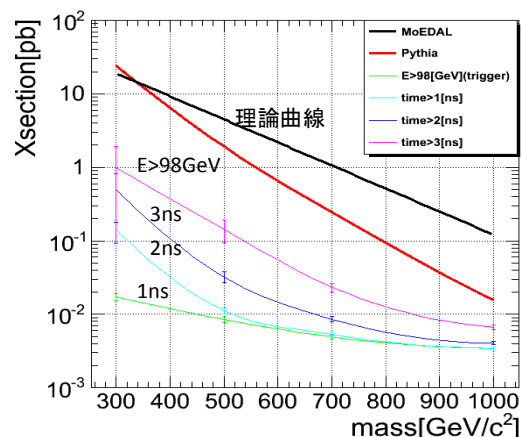


図4. 生成断面積の理論値とカットごとの生成断面積

3 生活

今回の CERN への滞在は物心ついてから初の海外といっても過言ではありません。すべてが新鮮でした。知らないおじさんの車に何度かお世話になり、初対面の街の人たちと肩を組んだり、人々の寛容さに驚く日々を過ごしました。

今回の滞在では Saint-Genis のホステルに下宿しました。CERN から離れているため自炊する機会が多く、台所では様々な国から来た学生と食卓を囲み交流し、各国の料理を体験しました。私たち日本人もお好み焼きパーティを企画し、友人を呼んで楽しい一時を過ごしました。

学生たちが集まった時の会話はお国柄トークが多かったように思います。また、お互いの国の文法について話したり、同じ意味の言葉を各自の国の言葉に訳して教え合ったりもしました。同じ階に住んでいた William とは非常に仲良くなりました。到着初日から夕飯を食べに一緒に出かけ、その後、研究室が同じであることが分かり長い時間を共に過ごしました。出会ったその日に「お前の英語はヘタクソだ」と罵られたりもしましたが、気がつくとも将来のことを共に話す程の仲になったのは良い思い出です。彼は理論の道を目指すそうです。将来会える日が楽しみです。

休日はジュネーブのお祭り・映画撮影などに参加したり、友人と旅行に出かけたりしました(図 5,6)。映画館に映画を観にも行きました。これは日本と変わらないだろうと思っていたら、映画観賞時の態度がまったく異なっており、衝撃を受けました。日本では静かに映画を観るだけだが、スイスの映画館では何か起る度、大きな笑い・歓声・拍手が響き、日本では考えられないような状態でした。



図 5. ゾンビ映画撮影会にて



図 6. フランスで行われたお祭りに参加した Summer Student たち

Summer Student 主催のパーティも何度か行われました。友人を増やす絶好の機会なのでできるだけ参加しました。この時に音楽やダンスが好きな友人ができました。彼は普段からも積極的で陽気です。陽気なだけとっていたら大間違いで、友人はほぼ毎日図書館で遅くまで勉強していました。研究においても成果を挙げています。このパワフルさに対して純粋に尊敬しています。

4 今後このプログラムに望むこと

Summer Student Programme の公募または告知を早くするべきであると思います。また、参加決定後から CERN 到着までの期間に説明会などが日本国内であることを望みます。過去に参加した方の話を聞くことのできる機会があるとより良いと思います。

5 今後の抱負

今回のプログラムで学んだのは自分から積極的に動くことの大切さである。CERN での指導教官は多忙な方で、毎日のように会議に参加しており、時間がある時に進捗を聞きにくる程度でした。研究に詰まっても議論する機会を待つだけでした。ある日を境に、研究の成果をメールで報告したり、昼食時を狙って話しかけたりすることで、議論の機会も増え、研究が良い方向へ転がり始めました。その他にも、自分から動き出さねば、得られないような機会はいくつもありました。今後とも、この経験を生かし研究に精進して行きたいと思います。

6 おわりに

最後に、このプログラムに参加するにあたり様々な支援、協力をして下さった KEK の方々に深謝いたします。また、推薦書を書いていただきました飯嶋先生、このプログラムを紹介して下さいました戸本先生、ありがとうございました。そして、CERN の研究室で丁寧に指導して下さいました Steve 氏、CERN での生活のアドバイスを下さった先輩方、共に日本から参加した田代君・田中君・関口さん・廣瀬君をはじめ、ここでは書ききれないですが様々な人のお世話になりました。

参考文献

私の研究で参考にした文献を挙げておきます。

- [1] The Electromagnetic Calorimeter Technical Design Report.
- [2] CMS Physics Technical Design Report Volume I: Detector Performance and Software.
- [3] TECHNICAL DESIGN REPORT OF THE MoEDAL EXPERIMENT.
- [4] Feasibility Study of a Magnetic Monopole Trigger in $p\bar{p}$ -collisions.
- [5] Dirac Magnetic Monopole Production from Photon Fusion in Proton Collisions.