

CERN Summer Student Programme 2014 参加報告

東京大学大学院 理学系研究科

竹 馬 匠 泰

nchikuma@hep.phys.s.u-tokyo.ac.jp

2014 年(平成 26 年)9 月 22 日

1 Summer Student Programme

私は、2014 年 6 月 23 日から 8 月 29 日までの 10 週間、Summer Student として CERN に滞在した。滞在中は CMS のソフトウェアグループ SFT に所属し、GENAT4 における高エネルギー陽電子の対消滅過程について研究を行った。研究活動以外にも講義やワークショップを通して多くのことを学び習得することができ、また日本とは異なる生活習慣や共に研究活動をした友人たちからの刺激によって得られたものも多かった。ここでは、CERN での活動内容と滞在中で得られた経験について報告する。

2 活動内容

2.1 Lecture

7 月 1 日からの 6 週間は午前中に講義を受けることができた。内容は様々で、素粒子物理や標準模型の理論的な内容から、検出器、トリガー、DAQ についてなど実験的な内容のものまであった。英語で講義を受けるということだけでも私にとっては貴重な経験であったが、その内容もこれからのお研究生活にとって有益であろうと感じられるものばかりであった。

2.2 Visit

このプログラム中には CERN の中の様々な施設を見学する機会が多く設けられていた。ATLAS, CMS, ALICE, LHCb などの検出器はもちろん、Data Centre や Anti-Matter Factory などの施設を見学することができた。

2.3 研究活動

2.3.1 Study of High Energy Positron Annihilation in GEANT4

陽電子は物質中を通過すると物質原子中の電子と対消滅することによって二つの光子を生成する。しかし陽電子のエネルギーが十分に大きくなると対消滅によってミューオンペアを生成することが可能になる(図 1)。そのエネルギー閾値 E_{th} は、実験室系において、

$$E_{th} = \frac{2m_\mu^2}{m_e} - m_e \approx 43.69 \text{ GeV} \quad (1)$$

で与えられる。さらに高エネルギーでは、それぞれのエネルギー閾値に対応して (π^+, π^-) , (π^+, π^-, π^0) , (K^+, K^-) , (K_L, K_S) , (η, γ) , (π^0, γ) などのハドロンも生成し得るようになる。

これらの高エネルギー電磁反応過程の起こる確率は 10^{-6} から 10^{-5} 程度と非常に小さいが、LHC の 13 TeV ランにおける新物理の探索 [1] や CLIC[2] などの線形加速器実験においては重要なバックグラウンドとなり得るため正確な予測が必要となる。本研究では GEANT4(version 10.01.b01)においてこれらの過程の反応断面積の validation を行った後、簡単なシミュレーションを実行した。

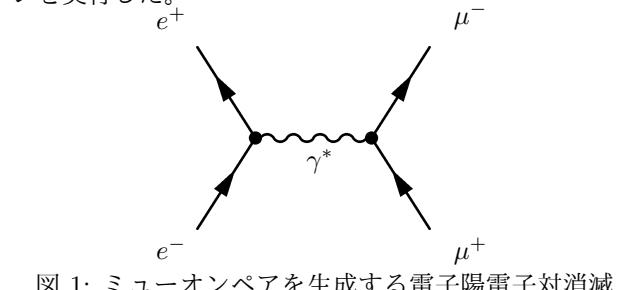


図 1: ミューオンペアを生成する電子陽電子対消滅

2.3.2 Modification and Validation of High Energy Electromagnetic Process

GEANT4 のカーネルから電磁過程の反応断面積をユーザーアクションに取り出すとき、ヘルパークラス G4EmCalculator が使用できる。このクラスは G4VEmProcess のみを参照していたが、今回 G4AnnihiToMuPair も参照するように修正を加えたことで上記の高エネルギー電磁過程すべてにおいて反応断面積を扱えるようになった(図 2)。これらすべてのアップデートは GEANT4 のすべての validation 過程を通過し CMS ソフトウェアの private patch に置かれている。

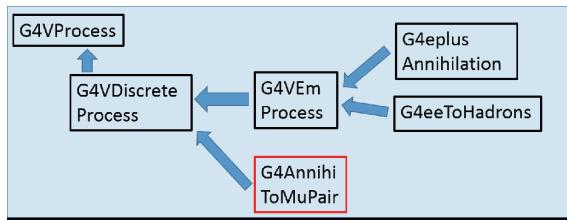


図 2: 高エネルギー電磁過程を定義するクラス

つづいて、GEANT4 の反応断面積を理論計算と比較することによって validation を行った。対消滅の後に二つの光子、またはミューオンペアを生成する過程の反応断面積は次のように計算された。

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma) = \frac{Z\pi r_e^2}{\gamma + 1} \left[\frac{\gamma^2 + 4\gamma + 1}{\gamma^2 - 1} \ln(\gamma + \sqrt{\gamma^2 - 1}) - \frac{\gamma + 3}{\sqrt{\gamma^2 - 1}} \right] \quad (2)$$

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-) = \frac{\pi r_\mu^2}{3} \xi \left(1 + \frac{\xi}{2} \right) \sqrt{1-\xi} \quad (3)$$

これらの式において、 E :陽電子の全エネルギー(実験室系), $\gamma = E/m_e$, r_e :古典電子半径, $r_\mu = r_e m_e/m_\mu$, $\xi = E_{th}/E$, $E_{th} = 2m_\mu^2/m_e - m_e$ である。GEANT4 の断面積はこの理論計算の結果と正確に一致することが確認できた(図 3)。ハドロンへの対消滅過程の断面積の validation は、ミューオンペアへの対消滅の断面積との比を用いて、Particle Data Group の実験データ(図 4)と比較することによって行った。

2.3.3 Simulation in a Simple Setup

高エネルギー電磁過程について Validation が終了した後、これらの過程がどの程度の確率で起こり得るのか確認するために、十分に厚い標的を用意し 10^7 個の陽電子を照射するという簡単なシミュレーションを行った。

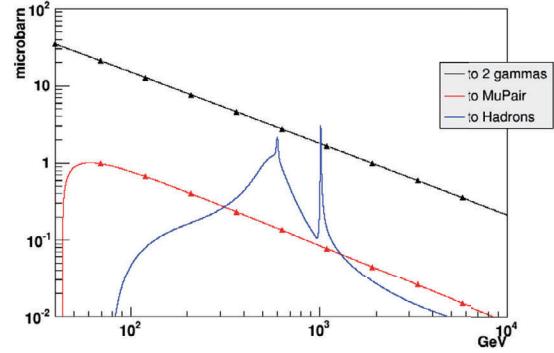


図 3: 電子陽電子対消滅過程の原子あたりの全断面積。横軸は電子静止系における陽電子の全エネルギー。実線は GEANT4 の断面積、三角のマークは理論計算。

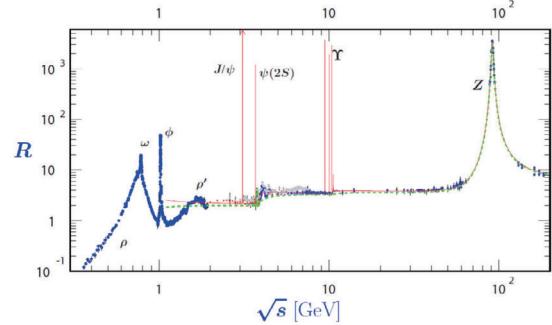


図 4: 電子陽電子対消滅におけるハドロン生成過程とミューオン生成過程の全断面積比(PDG データ)。 $R = \sigma(e^+e^- \rightarrow \text{hadrons})/\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)$ 。横軸は重心系における全エネルギー。

結果を図 5 に示す。確率 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ と小さいながらも確かにこの反応が起こることが確認でき、今後 13 TeV の LHC で行うような高エネルギー高イベントレートとなる実験においては、これらの反応過程についても慎重に予測する必要があることが示唆された。

3 生活面でのエピソード

私はこのプログラムの間、フランスの St. Genis にある CERN Hostel に滞在した。ホステルには、同じように Summer Student として各国から集まった学生が滞在していて、彼らとの共同生活は非常に有意義なものであった。CERN Summer Student Programme は物理の学生だけでなく engineer や computer science の学生も参加しているため、そのような学生と CERN での研究について英語で議論をしたり同じ講義を受けて彼らと自分との理解の仕方の違いを知ったりできることは、私にとって初めての経験であり貴重なものとなった。その他にも、交代でそれぞれ自分の国の料理を皆に振舞ったり一緒にスポーツをしたりなど、いわゆる文化の違いを感じ

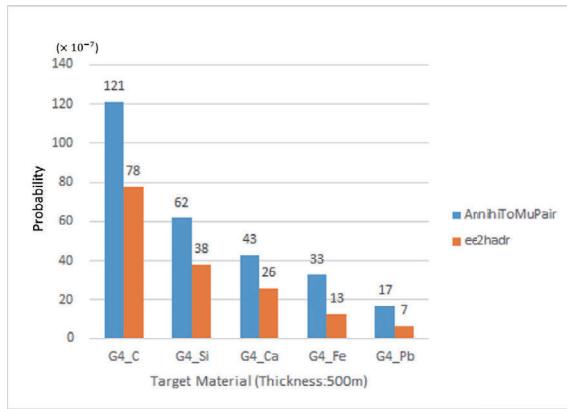


図 5: 陽電子が対消滅によってミューオンペアまたはハドロンを生成する確率。陽電子のエネルギーを 1 TeV に固定したときの、標的の物質依存を示す。

じる機会は多くあった。英語さえ話せれば様々な国からの友人とコミュニケーションをとることができ、彼ら自身のことや彼らの国のことについて知れたことはまたない機会であったと思う。

私がもっと驚いたのは日本語や日本の文化に興味を持っていて、勉強している人の多さである。私からみると、彼らは自分の国についても非常に良く理解し、かつ自信を持っているようにも見えた。その上で日本のことにも興味を持ってくれていたのだが、そのような友人たちと日本のこと教えながら話していると、改めて私自身が日本のことによく知らないことに気づかされた。



図 6: Summer Student の友人たちとディナーに行ったとき。右端に私。

4 今後の抱負

CERN での研究生活を通して、大きなグループの中においても一人ひとりの仕事それぞれが全体として重要になり、なおかつ各々が自らの仕事に責任をもっていることを再確認させられた。私は Summer Student として CMS という大きなグループに属しその中のごく一部の

研究を任せられたに過ぎなかったが、どの会議でも自身の研究については責任者として扱われ結果が求められた。日本でも T2K 実験に所属し研究を始めているが、自分自身の研究に責任を持つことを忘れず、また自信をもって続けることができるよう精進していきたい。

他には、語学力の重要性も改めて思い知らされた。他の国から参加している Summer Student たちの英語力は明らかに日本人のそれよりも優れていて、いくら自分が良く理解していると思っても彼らの会話の速さについていけず主張できない、ということが CERN 到着直後は多々あった。この 10 週間で私の英語力も少しは向上したと思っているが、今後日本でも国際的な実験グループに所属し活躍するべく、さらに語学力は高めたいと思っている。

5 今後このサマースチューデントプログラムに望むこと

私自身はこの CERN Summer Student Programme の間十分に満足できる研究生活を送ることができたため、特にこれ以上望むものはないと思っている。強いて言うならば、より多くの日本人学生にこのプログラムを経験する機会があればよいと思われる。人数が多くれば良いのはもちろん、日本以外の国のように物理以外の分野の学生にも機会が与えられれば、日本人同士の間でも今よりさらに学ぶことがあるのではないかと思った。

6 謝辞

最後に、このプログラムに参加するにあたりお世話になった皆様に深く感謝申し上げます。このような貴重な機会を与えてくださった KEK の皆様、CERN での研究活動を支えてくださった CMS SFT グループの皆様、このプログラムに応募する際にご指導してくださった横山准教授、共に Summer Student として参加した学生の皆様、そのほかご協力いただいた多くの皆様に御礼を申し上げたく、謝辞にかえさせていただきます。

参考文献

- [1] Geant4 simulation of production and interaction of muons. A. G. Bogdanov, H. Burkhardt, V. N. Ivanchenko et al. 2006. 7pp. Published in IEEE Trans. Nucl. Sci. 53 (2):513-519, 2006.
- [2] CLIC Conceptual Design Report. M. Aicheler, et al. CERN, 2012. -841 p.