

Vietnam School on Neutrinos 2023 参加体験記

京都大学

笠井 優太郎

kasai.yuutarou.57a@st.kyoto-u.ac.jp

2023年(令和5年)8月6日

1 Vietnam School on Neutrinos についての概要

この度、私は去る7月18日から28日に開催された Vietnam School on Neutrinos 2023 に参加した。(以下 VSoN と書く。) この記事では、そこでの具体的な講義、活動の内容や現地での生活を報告したい。そもそも VSoN とはベトナム、クイニョンに位置する International Centre for Interdisciplinary Science and Education (ICISE) で開催されたニュートリノに関するスクールであり、主催は日本のニュートリノ物理学者、the Institute for Interdisciplinary Research in Science and Education (IFIRSE), Rencontres du Vietnam である。ニュートリノ実験に関心を持つ学生を養成することを目的としており、2017年に第一回が開催され今年で晴れて七回目を迎えた。本年度の参加者は合計27名であり、日本、中国、台湾、ベトナム、インド、ネパールなどの多様なアジアの機関から集まった。

スクールの日々のプログラムは、教授陣の講義、ハードウェアトレーニング、ソフトウェアトレーニングから構成されている。初週は基本的に講義がメインであったが、二週目には午後の時間を使って、シンチレータを用いた実験や、チェレンコフ光解析のためのソフトウェアを用いたトレーニングを積むことができた。さらに、4人ないし5人のミニグループ6つに参加者を分け、各グループで興味のある課題を一つ選択し最終日に各班30分程度のプレゼンテーションを行ない、これはミニプロジェクトと呼ばれた。また、日曜日の自由時間や遠足の時間も設けられており、その時間を活用して参加者との親睦を深め、ベトナム観光なども楽しむことができた。

2 講義

この記事のために改めて VSoN を振り返ると総計20コマほどの講義があり、最初のものなどは今改めて思い返すと非常に懐かしい気持ちになる。始めは荷電粒子の検

出方法や標準理論の講義などニュートリノ物理学を行う上での基本的な講義から始まった。そののち徐々にギアを上げていき、T2KやDUNE実験、ハイパーカミオカンデなどの実際のニュートリノ実験施設の解説も行われた。全体の講義のなかで特に印象深かったのは Bhubaneswar 大学及び University of Wisconsin-Madison 所属の Sanjib Kumar Agarwalla 氏によるニュートリノ現象論の講義であった。氏の講義はニュートリノ振動からレプトンセクターにおける CP 破れや質量階層性問題などといった現代のニュートリノ物理学に残されている問題に至るまで、熱意溢れる語り口で非常に引き込まれる授業構成であり、氏のニュートリノ愛をひしひしと感じた。また、生徒とのコミュニケーションを重視しており、授業風景や質問に対する情熱的な回答から私にとって最も印象的な講義になっている。

余談だが、氏の提案で Cowan, Reines らによるニュートリノ発見論文の投稿日である7月20日 [1] を祝うべく、ケーキが用意され、誕生日パーティーが開催された。その際のケーキの様子が図1である。この記事を読んだ皆様もぜひ来年はニュートリノの誕生日を共に祝いませんか？



図1: ニュートリノの誕生日ケーキ。お誕生日おめでとう!!

3 ソフトウェアトレーニング

3.1 スーパーカミオカンデ

ソフトウェアトレーニングのためにスーパーカミオカンデで実際に用いられているコンピュータのアカウントを作成した。その後、サンプルのデータを用いてスーパーカミオカンデ内の電子のイベントとミュオンのイベントを確認した。図2は電子のイベントである。また、ミニグループの班員と共に、電子とミュオンを判別する各班対抗のミニゲームも開催された。電子においては電磁シャワーを発生しうするため、ミュオン事象と比較してチェレンコフリングがぼやけるという話は講義で説明されていたのだが、実際に自分でイベントディスプレイを確認してみると違いはあいまいでPIDの難しさを自分自身で体感することができた。現在は機械学習を用いているそうだが、過去には実際に人間の目でPIDが行われていたのとのことで頭の下がる思いである。ちなみにミニゲームの勝敗だが、僕らの班は同率一位にも関わらず、僕がじゃんけんに負けたため、二番手の座に甘んじることとなった。

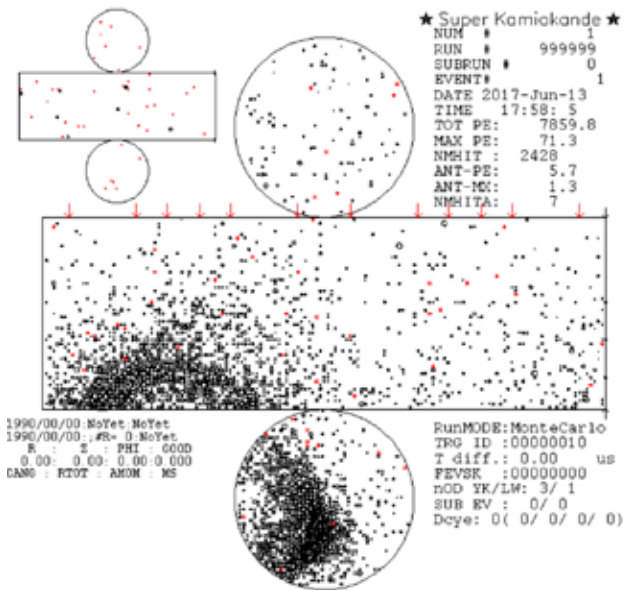


図 2: スーパーカミオカンデ内における電子事象

3.2 GLoBES

また、ソフトウェアトレーニングはもう一コマあり、GLoBES と呼ばれるニュートリノ振動解析シミュレーションソフトの解説も行われた。ただし、この授業に関しては最終日のプレゼンテーション直前だったこともあり、実際にプログラムを行ったりシミュレーションを行ったわけではなく、ソフトを用いる際の全体の流れや思想について授業を聞くのみであった。

4 ハードウェアトレーニング

ハードウェアトレーニングではミニグループのメンバーと共に午後二日間を用いて、宇宙線ミュオンを検出する手法について学んだ。

プラスチックシンチレータ四枚を鉛直方向に重ねて、荷電粒子である宇宙線が通過した際の光を波長変換ファイバーを介してMPPCで検出した。そして、信号をオシロスコープで取得しシグナルを得た。また、シンチレータのうち三枚のコインシデンスを取ることで、信号が宇宙線由来のものであることも確認した。実際のハードウェアトレーニングの様子が次の図3である。暗幕の下にシンチレータが置かれており、画面中央のオシロスコープでシグナルを取得した。

宇宙線のカウント数は $0.566 \text{ cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ が得られ、Particle Data Groupにある $\approx 1 \text{ cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ [2] とはやや異なるが、実験施設が地下にある点からカウント数が減少したため、宇宙線を観測できたと考えられる。もちろん、より詳しい考察が必要とされるが、短いスクールの期間を鑑みて今回は観測にのみ注力した。

ハードウェアトレーニングはミニグループの班員と共に協力して行ったが、必ずしも素粒子実験に慣れておらず、オシロスコープを始めて触るメンバーもいた。筆者は経験があったので、英語でコミュニケーションをとりながら測定方法を説明するのは良い復習になったと感じる。



図 3: ハードウェアトレーニングの様子

5 ミニプロジェクト

5.1 概要

はじめにも述べたが、ミニプロジェクトとは各ミニグループが選択した課題について議論し、最終日に質疑応

答を含めた 30 分程度のプレゼンテーションを行うというものである。各班に与えられた課題はさまざまであり、

- Jarlskog invariant
- 原子核乾板
- ニュートリノ質量の精密測定
- ニュートリノ振動測定におけるエネルギー再構成
- ニュートリノの質量階層性問題

などが与えられた¹。各々の課題について各班が所定の時間や空き時間を活用して、最終日のプレゼンテーションに備えた。

5.2 ニュートリノ通信

5.2.1 概要

いきなり題名が似非科学になったと思われた方もいると思われるが、僕は真面目である。というわけで、筆者の所属する班の課題について述べる。筆者が選択した課題は「ニューヨーク、東京間のニュートリノを用いた通信技術の可能性について議論せよ。また、従来の通信技術と比較した際の利点はどうのようなものか。さらに、ニュートリノ通信の発展において最も難しい点は何だろうか。」というものである²。僕が真剣なことが分かっていたただけだろうか。実際、ニュートリノ通信は以前より考えられており、例えば [3] がある。筆者の班の議論も大いにこの論文を参考にした。

5.2.2 利点

現行の通信は光ファイバーを利用しておりニューヨーク、東京間は地球表面を信号が伝達している。これは距離にして 9200 km に及ぶ。一方ニュートリノ通信が実現した場合、地球表面を沿う必要はなく、直線的に通信を行うことができるので、距離は 8400 km でよい。従って、通信距離が短くなり、約 3 ms 通信時間が短くなる³。これは、ささやかな違いに見えるが、金融市場における高頻度取引などにおいてレイテンシは極めて重要であり、実現されれば社会的インパクトが大きい。また、ニュートリノは弱い相互作用のみを行うため信号が妨害されにくく、地球外生命体との通信手段にも用いられうる。

¹実際はもう少し長い文章で説明されていたが筆者が翻訳し、要約した。

²翻訳は筆者による。

³この計算はかなり単純化されており、光ファイバーの屈折率による光速の変化や通信経路が最短でないことを考慮していない。

5.2.3 実現性

まず、始めに現状実現可能なニュートリノ通信の状況を考察する。その際、実際に使用可能な長基線ニュートリノ実験で用いられている、加速器と検出器を考慮して現在のニュートリノ通信の妥当性を考える。ニュートリノ通信においては、ニュートリノの個数が重要であることを鑑み、on-axis の実験である DUNE 実験の加速器と検出器を用いることを考えた。DUNE 実験において加速器は Illinois 州 Batavia にある Fermi National Accelerator Laboratory に位置している。また、検出方法は液体アルゴンを用いた TPC であり South Dakota 州 Lead にある Sanford Underground Research Facility に加速器から 1300 km 離れて置かれている。

表 1: 計算に用いた値。[4], [5] から得た。

パラメータ	値
サイクルごとのプロトン	7.5×10^{13}
一年あたりの protons on target	1.9×10^{21}
十年あたりの予想されるイベント数	13773

表 1 に記載されている加速器のデータを用いると、10 年あたりの spill 数の合計は

$$\frac{1.9 \times 10^{21}}{7.5 \times 10^{13}} \times 10 = 2.53 \times 10^8 \quad (1)$$

となる。従って、各 spill あたりのニュートリノを検出する効率は

$$\frac{13773}{2.53 \times 10^8} \quad (2)$$

である。

次に、ニュートリノが検出された時を 1、検出されない時を 0 と考えて、現在実現可能な帯域幅を考える。80 bits の情報を 99% の正確性で送信したいと考えたとき、検出確率はポワソン分布に従うので

$$(1 - P(0))^{80} = (1 - e^{-\lambda})^{80} > 0.99 \quad (3)$$

が成立すればよい。ここで $P(0)$ はニュートリノが来ているにも関わらず、一つも検出できない確率である。これを解くと λ は 8.98 であるとわかり、1 bit の情報を伝える際に最低でも 9 個のニュートリノが必要なことがわかる。従って、1 bit の情報を送信するのに必要な spill 数を α と置くと

$$\left(\frac{13773}{2.53 \times 10^8} \right) \times \left(\frac{1300}{8400} \right)^2 \times \alpha = \lambda = 9 \quad (4)$$

となる。ここでは DUNE 実験の検出器、加速器の距離とニューヨーク東京間の補正も加えた。spill rate (Hz) を 1 Hz と仮定すると、現実の実験施設を用いた帯域幅は 7.04×10^6 s/bit となり、80 bit の情報を伝達するのに

6520 日必要なことが分かる。以上より、たった 80 bits の情報を送信するだけでも非常に長い時間が必要であり、現状実現性には問題がある。

5.2.4 今後の展望

今後の展望についても班員とディスカッションを行い、例えば 1 Mbit/s を得る方法についても話し合った。そのためには粒子のフラックスを 10^8 増加させ、検出器をマンハッタンと同じ面積 (87 km^2) で深さ 100 m とすれば DUNE 実験と比較してレートを 10^{13} 倍稼ぐことができる。そのためには加速器の運転を 1 MHz で切り替える必要があるなど問題が山積しており、実現にはまだまだ時間がかかることが予想される。ニュートリノフラックスが足りない原因として、加速器ニュートリノはパイ中間子の崩壊によるもので崩壊の運動学から横方向運動量を持ち、ビームが広がるのが挙げられる。そこで、ベータ崩壊を用いた電子ニュートリノビームであるベータビーム [6] を用いることでビームの広がりを改善する案も議題に上がった。

5.3 総括

以上のようにミニプロジェクトでは質量階層性問題のような現在のニュートリノ物理学の中心をなすような疑問からニュートリノ通信のような変わり種まで様々な発表があり、どの班も実際の実験や解析を参考にしており完成度が高く、聴きごたえのあるものであった。自身の班の内容もどこから手をつければよいか分からないという難しさのある課題であったが、監督を務めて下さった KEK の大山雄一氏の助けもあり、何とか形にすることができた。終わってみて後から振り返ると、実際の実験の特徴を考慮する必要があるなど教育的な内容であったと感じる。

6 感想

短い間だったが VSoN に参加した経験は非常に有意義なものになったと感じる。どの講義、トレーニングもよく練られており、ニュートリノ物理学に対する理解を深めてくれた。さらに、ほかの参加者は必ずしもニュートリノのバックグラウンドを有していなかったが、それ故に、ミニグループでのディスカッションや日々の日常会話から良い刺激を得ることができた。また、遠足や日曜日の自由時間にベトナムの観光地に赴き、楽しい時間を過ごすことができた。

7 謝辞

このような素晴らしいスクールを開催していただいた日本、ベトナムの研究者や講演者の皆様には、感謝してもしきれません。心よりお礼申し上げます。また、ICISE センターのスタッフの方々には、慣れないベトナムでの暮らしを支えていただき、大変力強かったです。加えて、高エネルギーニュースの発行者の皆様、特に編集委員である原康二様からは慣れない執筆作業を手助けして頂きました。改めて、VSoN に関係する全ての方に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] C. L. Cowan, Jr. *et al.*, “Detection of the Free Neutrino: a Confirmation.”, *Science* **124**, 103-104 (1956). DOI:10.1126/science.124.3212.103
- [2] R. L. Workman *et al.* (Particle Data Group), *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2022, **083C01** (2022) and 2023 update
- [3] D. D. Stancil *et al.*, “Demonstration of communication using neutrinos.”, *Modern Physics Letters A* **27.12** (2012): 1250077.
- [4] James Strait *et al.*, “Long-Baseline Neutrino Facility (LBNF) and Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE) Conceptual Design Report Volume 3: Long-Baseline Neutrino Facility for DUNE June 24, 2015.”, arXiv preprint arXiv:1601.05823 (2016).
- [5] Peter Ballett, Stephen F. King, Silvia Pascoli, Nick W. Prouse, and TseChun Wang, “Sensitivities and synergies of DUNE and T2HK.”, *Phys. Rev. D*, **Vol. 96**, p. 033003, Aug 2017.
- [6] P. Zucchelli, “A novel concept for a $\bar{\nu}_e/\nu_e$ neutrino factory: the beta-beam.”, *Physics Letters B* **532.3-4** (2002): 166-172.