

Ozaki Exchange Program 2024 活動報告

東京大学理学系研究科物理学専攻博士課程 2 年

児玉 将馬

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

2024 年 (令和 6 年) 10 月 2 日

1 はじめに

私は日米科学技術協力事業 Ozaki Exchange Program 2024 に参加し、2024 年 6 月 23 日から 8 月 31 日までアメリカ カリフォルニア州の SLAC National Accelerator Laboratory に滞在し研究をおこなった。期間中は、アメリカで建設予定の長基線加速器ニュートリノ振動実験である Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE) に関わり、超新星ニュートリノ測定のために SLAC で進められている新しい液体アルゴン Time Projection Chamber (LArTPC) の開発に携わった [1]。データ収集システムを構築し、光検出器である MPPC の性能評価、また、LArTPC プロトタイプの建設をおこなった。

2 活動内容

SLAC ニュートリノグループでは MeV スケールの物理のため、新しい LArTPC の R&D を進めている。この LArTPC の目的の一つは、ニュートリノとアルゴンの反応断面積を測定する DUNE 実験の補助実験で使用する事である。また将来的には宇宙に LArTPC を飛ばし、MeV 程度のガンマ線を捉えることも目標としている。

2.1 SLArpaas

上記の目標に向け、SLArpaas と呼ばれる新しい LArTPC プロトタイプを SLAC で建設中である。サイズは $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ と小型である (図 1)。いくつかのグループが R&D に関わっているが、DUNE グループは光読み出しに焦点を当てている。36 個の MPPC を使用し、4 個の MPPC (S13360-9935) を 1 つのチャンネルで読み出す。読み出しはデジタイザーで行い、CAEN の DT5560SE を使用する。DT5560SE は 32 チャンネルのアナログ入力があるが、そのうち 9 チャンネルを使用す

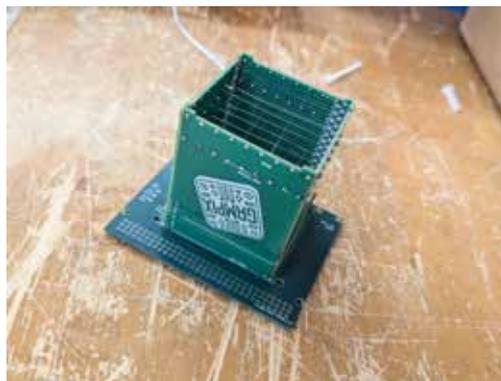


図 1: SLArpaas LArTPC の外枠。

る。このデジタイザーはユーザーがファームウェアを書くことができる。

2.2 DAQ システム

SLArpaas で用いるファームウェアを作ることが最初のテーマであった。ファームウェアへの要求は以下の通りである。

- 9 個のアナログ入力
- セルフトリガーと外部トリガー
- トリガー前後でのデータ取得
- 10 μs 以上のサンプル長
- タイムスタンプ
- イベント番号

作成したファームウェアの概略図は図 2 の通りである。このファームウェアは上述の要求を全て満たしている。

ファームウェアと同時並行で、DAQ のためのコードとデコーダーも作成し、後の解析で使いやすいようにした。これらは私が去った後も利用されている。

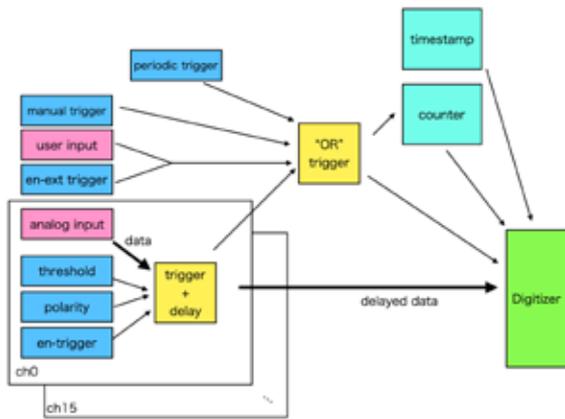


図 2: SLArpaas ファームウェアの概略図。いくつかの要素は見やすさのために省略している。2本の太い矢印は入力データの流れを表している。

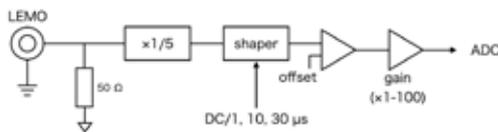


図 3: LEMO 入力から ADC までのブロック図。Shaper として DC coupling または 1, 10, 30 μ s の shaping time が選択できる。

2.3 デジタイザー

2.3.1 ウェブ設定

CAEN のデジタイザー DT5560SE は図 3 に示すように LEMO のインプットと ADC の間にいくつかのブロックを有する。ここで用いられるゲインやオフセットといったパラメータをウェブインターフェースを通じて設定することができる。

これらの設定が正しく動作しているか、簡単なファームウェアを作成し、100 mV の負のパルスを入力することで確認した。デフォルトの設定ではベースラインが 8190 付近 (14 ビットの中心) で、パルスの高さが 230 ADC 程度であり、ゲインやオフセットを変えると正しく信号の大きさや位置が変化することを確認した。

2.3.2 DAQ レート

デジタイザーおよびファームウェアの理解の一環として、DAQ のレートをサンプル長や波形を取得するチャンネル数を変えて確かめた。予想通り、レートはサンプル長やチャンネル数に依存して変化し、10 μ s \cdot 16 チャンネルでは 30 Hz 程度であった。

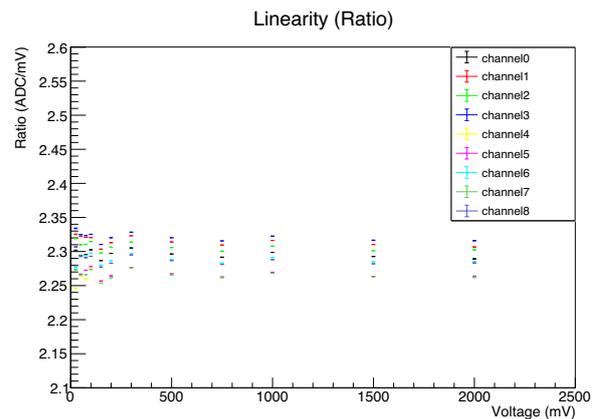


図 4: 入力パルスの大きさ (mV) と出力パルスの大きさ (ADC) の比率の入力パルス依存性。

2.3.3 ベースライン

同様の CAEN のデジタイザーを用いている ICARUS 実験では、ベースラインが時間変動することが確認されているため、アナログ入力を繋がずにベースラインの位置の変動を確認した。数秒程度の短い時間スケールと 1 時間程度の長い時間スケールでチェックし、どちらの時間スケールでも変動が見られないことを確認した。

2.3.4 線形性

パルスをアナログ入力に入れることで、デジタイザーの線形性を確認した。入射パルス (mV) と出力 (ADC) の変換因子はチャンネルによりやや異なるが、図 4 に示すようにどのチャンネルも約 2.3 ADC/mV であった。この値は 7.5 V のダイナミックレンジと 14 ビットから得られる値 (2.2 ADC/mV) と無矛盾である。

2.3.5 クロストーク

線形性の確認と同じデータセットを用いて、あるチャンネルに入力パルスがあった時の他のチャンネルの振る舞いを確認した。この確認から、いくつかのチャンネルの組について影響が見られたが、図 5 に示すように、この影響は非常に小さいことがわかった。

2.4 MPPC とプリアンプ

ファームウェア作成後、光読み出しの全体の流れである MPPC、プリアンプ、デジタイザーを繋ぎ、MPPC の出力信号を確認した。テスト用の MPPC が LED とともに箱の中に固定されたものが既に作成されていたため、これを使用した。またプリアンプもテスト用に作成されたものがあったため、こちらを利用した。これらは

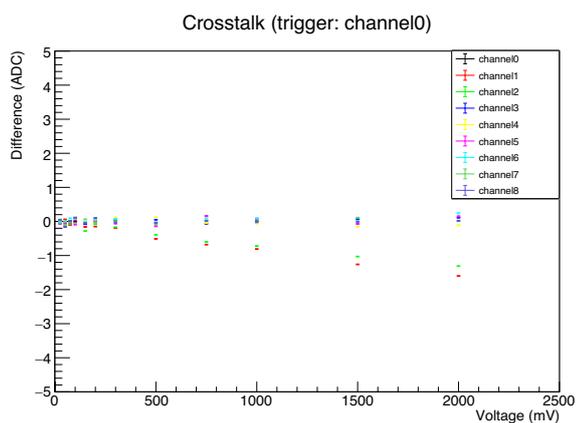


図 5: チャンネル 0 に信号があった時の他のチャンネルのベースラインのシフト。

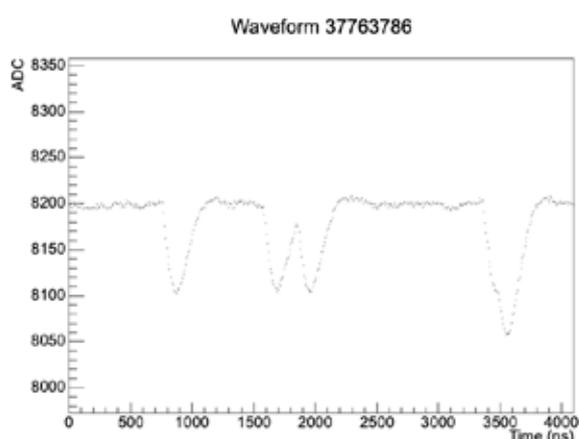


図 6: 取得した波形の例。

ブラジルから半年間留学に来ていた大学院生 Leonardo Peres 氏がテスト用に使用していたものである。

2.4.1 ベースライン

プリアンプに電圧をかけると MPPC に逆バイアス電圧をかけなくても、ごく稀に振動した信号が見られた。現地の人に確認をしたところ、これまでも見られた現象のようで、建物の都合であるとのことだった。滞在期間では原因特定は不可能であると判断し、こういった信号が見られることを引き継ぐのみにとどめた。

2.4.2 ダークレート

MPPC に逆バイアス電圧をかけると図 6 のような信号が得られた。ある閾値を通過する立ち下りの信号数を閾値を変えながらカウントすると、図 7 のようになり、最大で 1.33 MHz 程度であった。これは浜松ホトニクスが計測している値 (2 MHz) より小さいが、偶然同時計測数を考えると無矛盾であると言える。

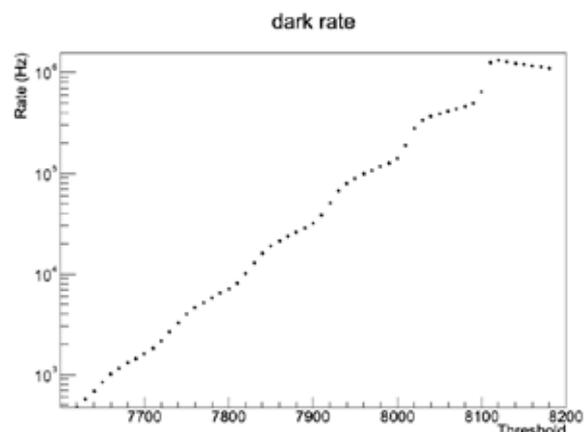


図 7: レートの閾値依存性。

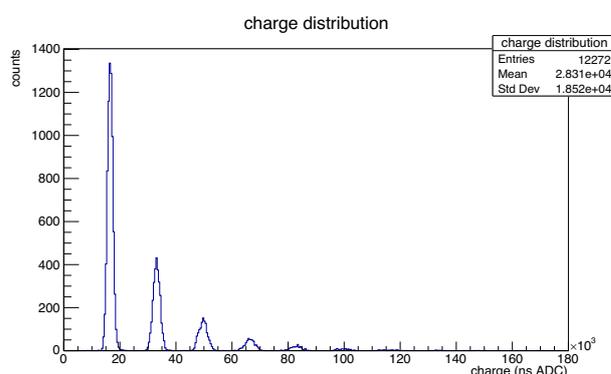


図 8: ダークパルスの電荷分布。

2.4.3 電荷分布

ダークパルスを積分して電荷分布を作成すると図 8 のようになり、各光子数に対応するピークが見られた。このピークの間隔 (ゲイン) を逆バイアス電圧を変えながら測定し、ブレイクダウン電圧を求めると、51.9 V となり、別の方法で既に求められていた値と矛盾しない結果が得られた。

2.4.4 LED

室温では MHz オーダーのダークカウントであるが、実際の使用環境である低温下では数 Hz オーダーになる。低温下では図 8 のような分布を得るのに長時間かかることになり、ダークカウントを用いた較正は現実的でない。外部光源を用いたゲインの較正が実際の運転中には不可欠であり、LED での較正の可能性について確かめた。

使用できたパルスジェネレータの最大出力が 2.5 V であったため、LED にかける電圧はこの値に固定し、パルスの幅を変えることで適切な値を調べた。例として図 9 にパルスの幅を 200 ns に設定した時の電荷分布を示す。この設定では光量が大きすぎるが、パルスの幅を小

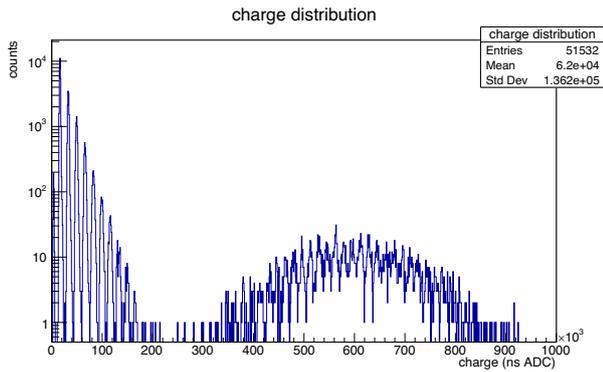


図 9: ダークパルスと LED 由来の電荷分布。電荷の小さい部分はダークパルス由来、大きい部分は LED 由来の信号。

さくすることで較正が可能である。低温下での LED の振る舞いについては別途調べる必要があるが、LED を用いればゲインの較正は可能であると結論付けた。

2.4.5 プリアンプボード

上述のテストの後、9チャンネル分のプリアンプが載ったボードが Steffen Luitz 氏によって作られ、テスト用の MPPC と合わせて読み出し試験を実施した。上述のベースラインの振動は引き続き見られた上で、新たに周期の短い振動が見られたため、原因を調査しようとしたが見つめることができなかった。振動のレートが小さいこと、振動が起きてもすぐ消えることなどから、現時点では影響は小さいと判断した。ダークパルスの電荷分布はテスト用のプリアンプを用いた時と同様の結果が全チャンネルで得られ、このプリアンプボードは使用可能と判断した。

2.4.6 4 MPPCs

SLArpaas では4つの MPPC を1つのチャンネルで読み出す。そこでテストとして、1チャンネル(4 MPPC)のみ接続し、波形の読み出しを実施した。予想通り、室温ではダークノイズのレートが高すぎて、図10のように常に信号が来ているような波形が得られたが、低温下ではダークレートが下がり、数光子程度の信号でもノイズに埋もれることなく検出することが可能はずである。

2.5 低温下での MPPC のテスト

低温下で MPPC が健全に動くか確認するため、液体窒素を用いた冷蔵庫の中で、ブレイクダウン電圧と MPPC の順方向に電圧をかけた時の抵抗(クエンチング抵抗)の測定を Leonardo Peres 氏と共同で実施した。テスト

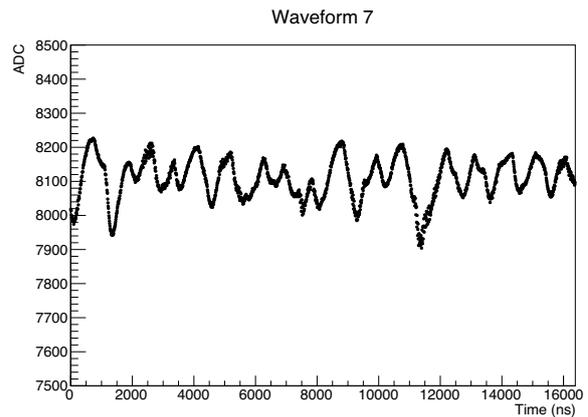


図 10: 4つの MPPC を読み出した時の波形。常にダークパルスが来ていることがわかる。

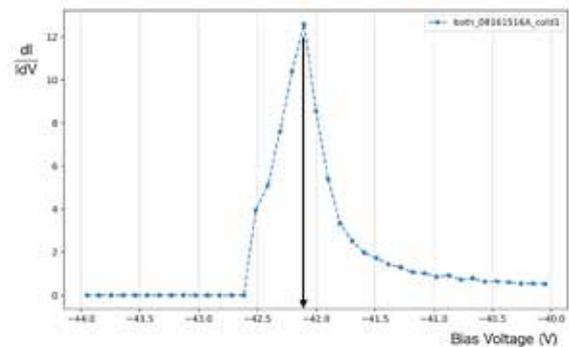


図 11: I-V 法。横軸に逆バイアス電圧、縦軸に dI/IdV をプロットしている。

は 80 K で行なった。実際に使用する MPPC と予備も含めて 45 個程度の MPPC について確認をおこなった。

2.5.1 ブレイクダウン電圧

ブレイクダウン電圧の測定は I-V 法で行なった。これは逆バイアス電圧を変えながら電流を測定したときに、ブレイクダウン電圧付近で dI/IdV が図 11 のように極大値を取ることを利用して測定する方法である。その結果、ブレイクダウン電圧は室温の時と比較して 10 V 程度小さくなることがわかった。

2.5.2 クエンチング抵抗

MPPC の順方向に電圧をかけ、MPPC のダイオードとしての性質を見ると、室温でクエンチング抵抗が 85 Ω 程度であったものが 80 K では 280 Ω となった。クエンチング抵抗が低温下で大きくなることは予想通りである。半導体としての健全性が確認できた。

2.6 SLArpaas の建設

上述の DAQ システムの構築および光読み出しのチェックに加えて、実際に LArTPC を沈めるデュワー容器の建設にも参加した。途中で一度リークチェックをしたところ、容器の O リングがうまくはまっておらず、真空が破れている箇所を発見した。その後、真空の確認が取れたのち、耐圧テストを行い、問題なく使用できることを確認した。

3 研究外の活動

2ヶ月余りの滞在の間、SLAC のニュートリノグループの方々、および同時期にサマースチューデントとして来ていた学生とは様々な交流ができました。特にサマースチューデントとして来ていた Leonardo Peres 氏と Khwaish Billore 氏とは研究の際はもちろんのこと、研究外でも多くの時間を共にしました。ニュートリノグループの方々にはバーベキューに参加させてもらったり、様々な機会です事に連れて行ってもらったりと親密な交流ができました。

特に印象に残っているのは Kendall Mahn 氏の発案で行った日帰り旅行です。有名な Redwood を見に Henry Cowell Redwoods State Park へハイキングに行った後、Santa Cruz でディナーをいただきました。研究外での交流でお互いの文化などを知ることができました。

期間中の滞在は、アメリカ国内のプログラムである SULI/CCI interns で借りていた宿舎と一緒にしてもらいました。夜はコモンルームで映画を観たりビリヤードをしたりして交流しました。Intern の人たちのパーティにも呼んでいただき、仲を深めました。

週末はサンフランシスコへ観光に行ったり、大型スーパーマーケットへ行ったりして、異文化を経験しました。同じ宿舎にいた日本が好きという学生から、サンフランシスコの日本街に対する日本人としての意見を求められたため、実際に日本街へ行き、アメリカから見る日本のイメージを経験することができました。

4 謝辞

今回の渡航にあたっては、様々な方のお世話になりました。指導教員の横山将志教授にはプログラムの応募時に推薦書を書いていただいたり、受け入れ先の選定の際にもアドバイスをいただきました。受け入れ教員の Hirohisa Tanaka 氏にはこちらからの受け入れのお願いを快諾していただいた上、渡航前から Zoom でお話しする機会を設けていただき、スムーズなスタートが切れました。Yun-Tse Tsai 氏、Gianluca Petrillo 氏、Steffen

Luitz 氏とは滞在中ほぼ毎日議論をさせていただき、研究内容および方向性を決めることができました。そのほかにも SLAC ニュートリノグループの方々には、毎週のミーティングでコメントをいただいたり、お世話になりました。

参考文献

- [1] T. Shutt *et al.*, arXiv, 2402.0090 (2024).