

Ozaki Exchange Program 2023 活動報告

東京大学 宇宙線研究所

三木 信太郎

smiki@km.icrr.u-tokyo.ac.jp

2023年(令和5年)10月4日

1 はじめに

私は日米科学技術協力事業 Ozaki Exchange Program 2023 に参加し、2023年6月25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、前置検出器において用いることが検討されているキャリブレーション手法の確立に携わった。

2 活動内容

2.1 レーザーキャリブレーションの概要

DUNEの前置検出器は、複数の検出器を組み合わせ生成直後の加速器ニュートリノの状態を測定することを目的としており、その中核となるのがNear Detector Liquid Argon TPC (ND-LAr)である。ND-LArは $1 \times 1 \times 3 \text{ m}^3$ の大きさの液体アルゴンTPCを 7×5 個並べて全体で $7 \times 5 \times 3 \text{ m}^3$ の検出器となる計画で、DUNEの後置検出器と同じ原理で動作する液体アルゴンTPCであることから、ニュートリノ振動実験での系統誤差の削減が期待される。

TPC検出器においては、液体アルゴン中で生成した電離電子を、ドリフト軸に垂直な方向に拡散・変位させることなく電荷読み出し部までドリフトさせその位置を測定することが、正確な事象再構成のために重要である。これには、電場の一様性、カソード・アノードの位置のずれや傾きが関係するが、位置の正確に分かった十分小さな電子源からの電子を実際に観測することによって、最終的に必要な量である電子の拡散・変位量を直接キャリブレーションすることができる。このような電子源として、カソードに取り付けた金属片にレーザー光を照射して放出される光電子を用いることが検討されており、レーザーキャリブレーションと呼ばれて

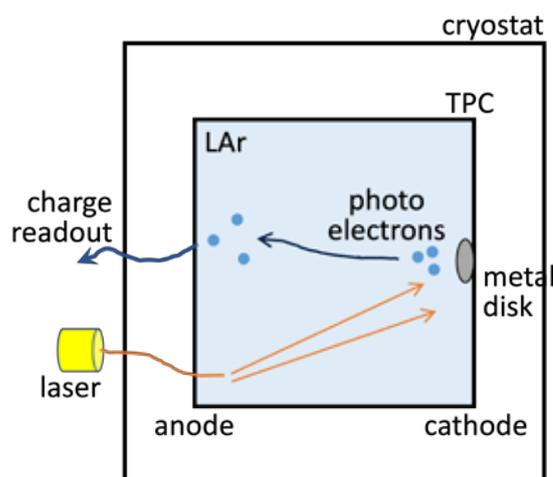


図1: レーザーキャリブレーションの概略図。カソードに取り付けた金属片から出る光電子を観測することで、TPC中での電子の拡散・変位量をキャリブレーションする。

いる(図1)。そこで私は、金属片から十分な量の光電子が得られるかを見積もるための、金属片の量子効率(Quantum efficiency, QE)の測定、および、液体アルゴンTPC中での電子寿命の測定をおこなった。

2.2 量子効率実験の測定実験

量子効率測定の主な目的は、

1. レーザーキャリブレーションにおいて十分な量の光電子が得られるかを見積り
2. 金属片の酸化や不純物の付着による量子効率の時間変化の把握
3. 異なる種類の金属片での量子効率の比較

の3つである。3.については、アルミニウム板、亜鉛板、TPC壁面の素材に熔融アルミニウムを噴射コーティングしたものの3種類を比較した。

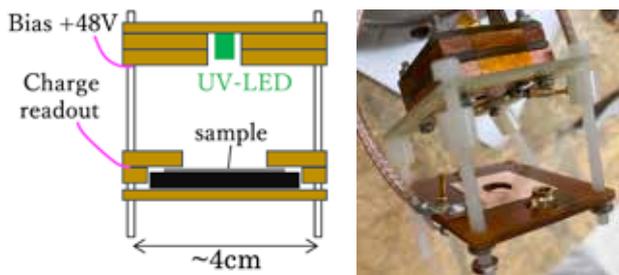


図 2: 量子効率測定の設定アップ。左: 概略図, 右: 実際のセットアップ (内側が見えるようナットを緩めている)。測定時は装置全体を真空容器に入れる。

2.2.1 測定方法

図 2 に測定をおこなったセットアップを示す。事前に Steffen Luitz 氏が作成したセットアップをもとに、プログラムの滞在期間中に、サンプル位置の再現性、サンプル交換の容易さ、光量見積りの精度をそれぞれ向上させるため改良をおこなった。測定は約 1×10^{-3} Torr の真空容器中で行い、UV-LED (波長 275 nm, パルス光量 82 mW, パルス幅 100 μs) をアノードの中央からサンプルに照射し、生じた光電子をアノードに印加したバイアス電圧で収集する。電荷の読み出しはサンプルを設置したカソード側から行い、charge sensitive amplifier (CSA) で積分した波形をオシロスコープで記録した。

得られた信号波形の一例を図 3 に示す。LED 光を照射している 0 – 100 μs の範囲で積分波形が直線に近くなっている。ただし、CSA の放電時定数 $\tau = 140 \mu\text{s}$ がパルス幅に対して無視できないため、わずかに下に凸の波形となっている。また、LED のオン・オフに伴い LED の電流が大きく時間変化する 0, 100 μs ではクロストークノイズが見られる。

光電子の生成による信号波形の傾き A [$\text{mV}/\mu\text{s}$] を求めるため、波形のフィッティングをおこなった。CSA の出力電圧 $V(t)$ [mV] は、CSA の放電時定数 τ を用いて

$$\frac{dV(t)}{dt} = -A - \frac{1}{\tau}V(t) \quad (1)$$

を満たすので、 $t = 0$ における V の初期値を C として

$$V(t) = (A\tau + C)e^{-t/\tau} - A\tau \quad (2)$$

と表される。 τ は既知の値に固定し、 A, C の 2 変数をパラメータとして波形をフィッティングした結果が図 3 の赤線である。

A は光電子の放出による電荷生成のレートを表し、これに LED の照射時間 100 μs をかけ既知のアンプによる増幅率を補正することで、この間の光電子生成数が求められる。

一方、サンプルに照射された光子の数は、パルスのエネルギーおよび LED の放射パターンから計算され、以

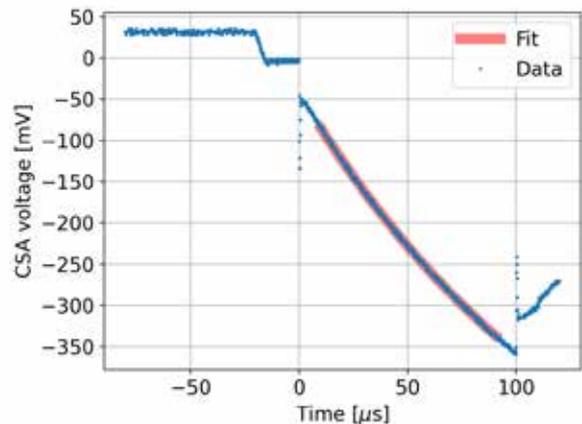


図 3: 得られた信号波形 (青データ点) とフィット結果 (赤線)。0 – 100 μs で LED 光を照射し、10 – 90 μs の範囲でフィットをおこなっている。この波形の場合、光電子の生成量に対応する波形の傾きは $A = 4.94 \text{ mV}/\mu\text{s}$ 、100 μs 間での生成光電子数は 7.5×10^5 、得られる量子効率の値は 1.8×10^{-7} である。

上の光電子の数と光子の数の比として量子効率を得られる。

2.2.2 時間変化の測定

光電子源として金を用いた場合、空気中では水や炭化水素が金表面に吸着されることにより、時間とともに量子効率に変化することが報告されている [1]。今回用いたアルミニウムや亜鉛のサンプルにおいても、サンプルを長時間放置した場合の量子効率の変化を観察した。

サンプル表面に吸着した物質や酸化層を落とすため紙やすりで表面研磨を行い、その後の量子効率の変化を観察した (図 4)。空気中で放置した 3 つのサンプルについては、経過時間の約 -0.5 乗に比例して量子効率の低下が見られた。一方、真空中に放置したサンプル (図 4 中の S3) では量子効率の低下が緩やかになることが確認された。

表面研磨を行う前の各サンプルの量子効率も図 4 に合わせて示す。研磨前の時点で、サンプルは少なくとも 1 ヶ月間 (720 時間) 空気中に放置された状態であったため、十分長い時間の経過後には量子効率は研磨前の値に収束すると予想されたが、実際には研磨前の値を下回ってもなお量子効率の低下が見られている。

続いて、窒素ガス充填下での量子効率の時間変化の観察をおこなった。サンプルの表面研磨と測定セットアップへの取り付けを含め、実験全体を窒素ガス充填下で行えるよう、真空容器の一部を覆うグローブボックスを作成した。グローブボックス内には酸素濃度計、湿度計を設置し、実験作業中には酸素濃度は 5% 以下、湿度は 3%

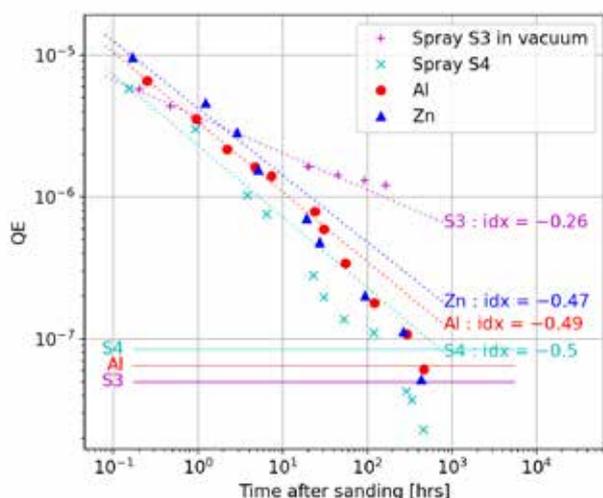


図 4: サンプルの表面研磨後の量子効率の時間変化。TPC 壁面素材にアルミニウムをコーティングしたサンプル 2 つ (S3, S4) およびアルミニウム板, 亜鉛板についての測定値。S3 は表面研磨を空気中でおこなった後, 真空中に放置した。その他のサンプルは, 真空中での測定時を除き空気中に放置した。水平線は対応する色のサンプルの表面研磨前の量子効率の値。点線はサンプルごとの $QE = A t^{idx}$ によるフィット結果で, 指数 idx のベストフィット値を付記している。

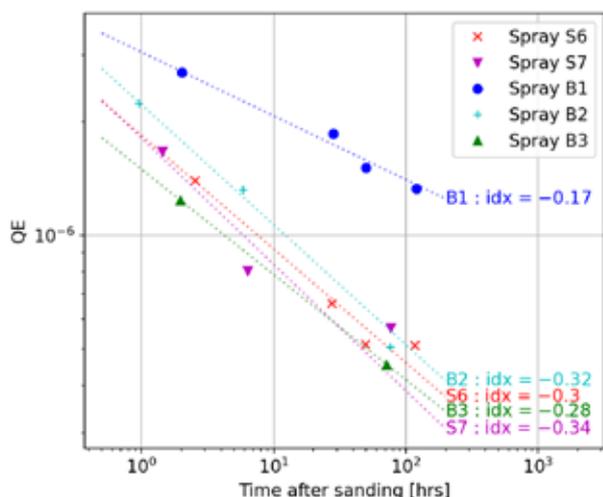


図 5: サンプルの表面研磨後の窒素充填下での量子効率の時間変化。TPC 壁面素材にアルミニウムをコーティングしたサンプル 5 つについての測定値。S で始まるサンプルと B で始まるサンプルは製法がわずかに異なるが, 量子効率の値に差異は及ばないと期待される。点線はサンプルごとの $QE = A t^{idx}$ によるフィット結果で, 指数 idx のベストフィット値を付記している。

以下に保たれることを確認した。このグローブボックスを用いて, 窒素ガス充填下でのサンプル表面研磨後の量子効率の時間変化を測定した結果が図 5 である。サンプル B1 のみ変化が小さいが, その他 4 つのサンプルでは似た変化が見られた。これらのサンプルでの時間変化の指数は -0.3 前後であり, 空気中にサンプルを置いた場合よりも緩やかで, 真空中での場合に近い量子効率の変化である。

以上の測定結果より, 金属片を真空中もしくは窒素ガス中に置いた場合には量子効率の低下が空気中と比べて抑えられることがわかった。また, アルミニウム板, 亜鉛板, アルミニウムをコーティングした TPC 壁面素材の 3 種類のサンプル間で, 量子効率の絶対値および低下の仕方に差異は見られなかった。

レーザーキャリブレーションにおいて観測される光電子の個数については, 量子効率を 10^{-6} とした場合に金属片 1 個あたり 1.4×10^4 個程度と期待される。現在 SLAC で前置検出器の研究開発に用いられている液体アルゴン TPC では, トリガー閾値が 4×10^3 電子相当程度なので, レーザーによる光電子雲の観測は可能だと期待できる。しかし, 表面研磨後数日が経過した金属片では量子効率が低くなり十分な光電子が生成しない可能性があり, レーザー光の光量密度を上げるなどの改善が試みられている。

2.3 TPC 中での電子寿命の測定

液体アルゴン TPC では, 液体アルゴン中で生成した電離電子を電場でドリフトさせ収集するが, 液体アルゴン中に残る不純物に電子が捕獲されることで, 観測される電子の数はドリフト時間とともに少なくなる。電子がどの程度の時定数で減少するかは, レーザーキャリブレーションにおいて発生した光電子のうちどれほどの割合を観測できるかを見積もる際に必要となるほか, 将来の物理ランにおいては入射粒子のエネルギー等を再構成するために重要なパラメータとなる。そこで私は量子効率の測定と並行して, TPC 中での電子の寿命 (減少時定数) の測定手法の開発をおこなった。

SLAC には前置検出器の研究開発のための 30 cm 立方の大きさの液体アルゴン TPC があるので, その検出器で昨年夏に取得されたデータを題材に電子寿命を測定した。この検出器はアノードが 4 mm 四方のピクセルに分割され, 各ピクセルに入射した電子の電荷量と到達時刻をピクセルごとのセルフトリガーで記録する。用いたデータは, 粒子線源等を何も用いず取得したデータで, 観測されるヒットは宇宙線ミュオンに由来するものかピクセルに生じるノイズかのいずれかである。このうち宇宙線ミュオンのトラックを用いて電子寿命を測定し

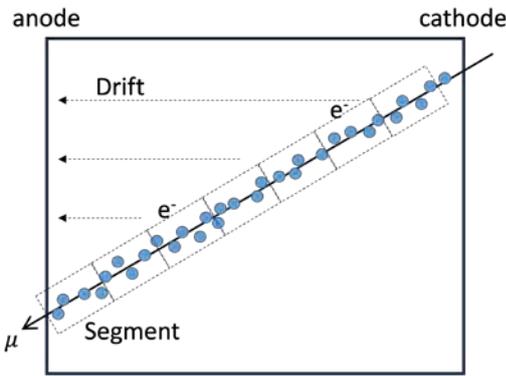


図 6: 宇宙線ミュオン軌跡を用いた電子寿命測定法の概略図。軌跡を長さ 30 mm のセグメントに分割し、各セグメントでの飛程あたりの観測電荷量 dQ/dx とドリフト時間を図 8 のようにプロットする。

た (図 6)。

まず、解析に用いるミュオン軌跡を、以下の 3 条件を満たすものとして選別する。

1. 軌跡を構成するヒットが直線をなす。
2. ドリフト方向に射影した軌跡長が 250 mm 以上である。
3. 軌跡がアノードを通過する。

1. は、軌跡を構成するヒットの 3 次元位置に対して主成分分析を行い、第 1 成分 (軌跡の長さ) と第 2 成分 (軌跡の太さ) の比が 50 以上であることを要請する。2. はカソード付近で生成された電離電子を多く用いるための条件である。ドリフト距離が長く減衰割合の大きいヒットを多く用いることで、後で行うフィットの精度を上げる目的がある。3. はミュオンの通過時刻 t_0 を決めるために必要な条件である。今回用いた TPC は、シンチレーション光を検出するための光検出器を備えておらず、ミュオンの通過時刻がわからないため、軌跡のドリフト方向の絶対位置は決定できない (図 7 の③と④)。一方で、軌跡がアノードを通過していれば、最も早く観測されたヒットを近似的に t_0 として用いることで、後続のヒットのドリフト時間や絶対位置を決められる (図 7 の①や②)。このような軌跡を選ぶため、最初のヒットがアノード板の縁ではない内側のピクセルで観測されたという条件を課した。

選ばれた軌跡を長さ 30 mm のセグメントに分割し、各セグメントに属するヒットの観測電荷量の和をセグメントの長さで割った値 dQ/dx を計算する。ただし、それぞれのセグメントに対し再度主成分分析を行い直線性の低いセグメントは除去した。ある 1 日間で観測された 416 本の軌跡に対し、 dQ/dx をドリフト時間の平均値に対してプロットしたものが図 8 である。観測さ

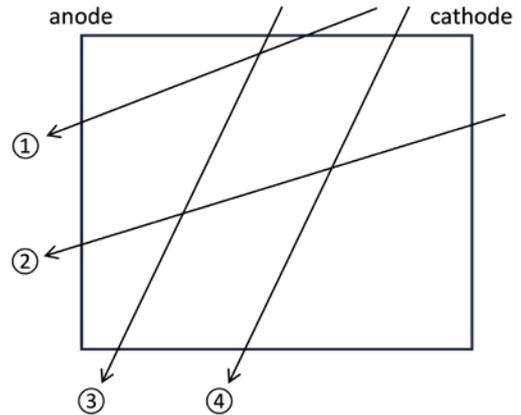


図 7: TPC に入射する宇宙線ミュオン軌跡の例。シンチレーション光検出器がないため③と④は区別できず、電子寿命の測定には使えない。アノードを通過する①や②のような軌跡を選択する。なお、粒子の走る向きは同定できない。

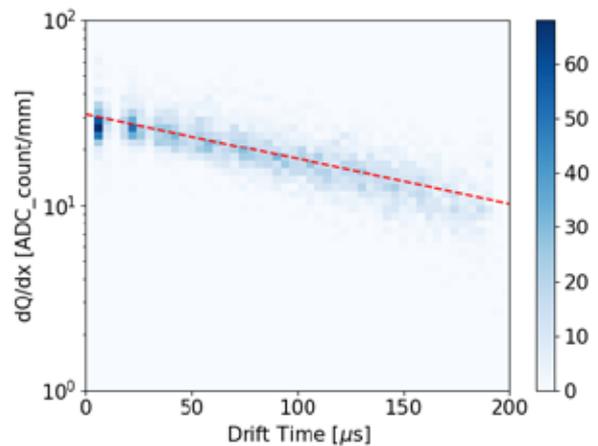


図 8: 2022 年 7 月 31 日に取得したデータでの、セグメントのドリフト時間に対する dQ/dx 。赤点線は指数関数によるフィット結果で、電子寿命が $180 \mu\text{s}$ となる。

れる電荷量がドリフト時間に対して指数関数的に減少する様が見られる。

この分布を指数関数 $A \exp(-t/\tau)$ で A , τ をパラメータとしてフィットすることによって、電子寿命 τ が求まる。

このようにして測定した電子寿命の、データ取得日時に対する変化は図 9 のようになる。SLAC の TPC では液体アルゴンの循環純化システムがなく、液体アルゴンの純度が時間とともに悪化することから、電子寿命も時間とともに短くなっている。

今年の秋には実際にアルミニウム片を SLAC のテスト TPC に設置してレーザーを照射するレーザーキャリブレーションの試験が行われる予定である。金属片からの光電子生成量などをこの試験で測定するためには電

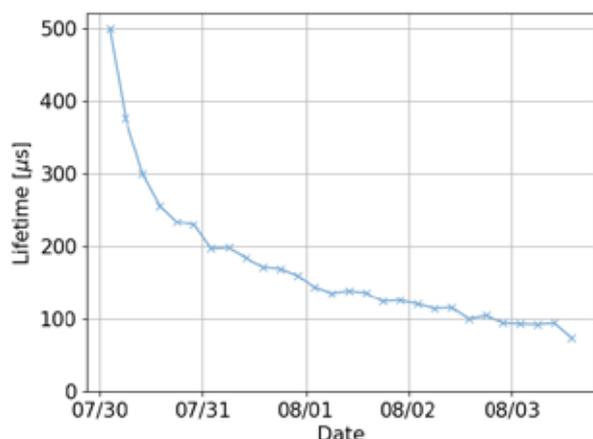


図 9: 2022 年夏に取得した TPC データでの電子寿命の変化。

子寿命の値が不可欠であり、今回開発した手法により電子寿命を即座に算出し試験データの解析が行えると期待する。

3 研究外の活動

2ヶ月余りの滞在期間中、SLAC ニュートリノグループの皆さんおよび同時期にグループに参加していたサマースチューデントの学生たちとは、研究活動以外の面でも様々な交流することができた。SLAC 周辺の様々な飲食店にも連れていってもらったが、トルコ料理、パキスタン料理、おにぎり専門店などもあり、日本を含む世界中の多様な国の食文化が入り混じっていることを実感した。

ニュートリノグループの十数人でセコイア国立公園に2泊3日のキャンプに行ったことは、特に大きなイベントとして印象に残っている。木々が点在する乾燥地帯や岩がちな山などカリフォルニアらしい自然を楽しみつつ、長時間生活を共にしさらに親睦を深めることができた。

また私が普段行っているスーパーカミオカンデでの研究についても1時間程度話すセミナーの機会をいただき、双方向の研究交流を持てたのは良い経験となった。

4 謝辞

今回の渡航にあたっては、事務的な面でも研究活動の面でも数多くの方にお世話になりました。指導教員である塩澤真人教授にはプログラムへの応募前から渡航先や研究内容の選定について相談に乗っていただきました。受け入れ教員の Hirohisa Tanaka 氏には、物理の議論や研究の進展状況を気にかけていただいただけでなく、宿泊先の紹介や食事の誘いなど生活全般にあたって大変

お世話になりました。Yun-Tse Tsai 氏、Steffen Luitz 氏ほか、SLAC ニュートリノグループおよび DUNE 前置検出器キャリブレーショングループの皆様は、実験について一から親身に教えてくださったり毎週のミーティングで時間をかけてコメントをくださったりしました。前述のように研究以外の面でも親しく交流していただき、楽しく2ヶ月間を過ごすことができました。

参考文献

- [1] Gerald Hechenblaikner *et al.*, J. Appl. Phys. **111**, 124914 (2012).