

CERN Summer Student Programme 2024 参加報告

マサチューセッツ工科大学 物理学専攻 PhD 1 年

深谷 駿冨

shung449@mit.edu

2024 年 10 月 16 日

1 はじめに

私は 7 月 1 日から 8 月 23 日までの 8 週間、CERN Summer Student Programme 2024 に参加した。本記事に、このプログラムでの活動を報告する。

2 活動内容

2.1 ワークショップ

講義やツアーの他に、幾つかのワークショップが用意されていた。¹ 私は Experimental Physics - Detector Technologies 部門の研究室が行っているシリコンセンサのワークショップに参加した。その研究室では粒子によるシリコンセンサのダメージを測定しており、彼らが普段行っている測定を実演していただいた (図 1)。4 時間で 2 つの測定を見学したが、どちらも私のような初学者にも分かり易い内容だった。グループの方々も親切で、見学終了後も私の質問に丁寧に対応してくれた。

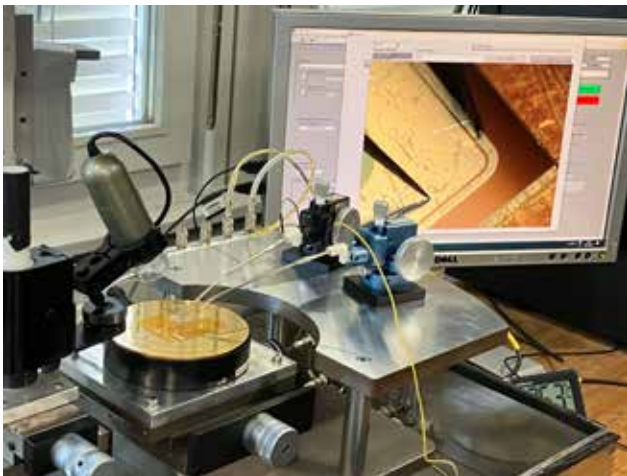


図 1: シリコンセンサのワークショップで実演された、センサのキャパシタンス測定。

2.2 研究

私は反水素のトラップと測定を行う ALPHA 実験グループに配属された。ALPHA は超低温の Penning-Ioffe トラップに捕獲した反水素の精密測定を通して CPT 対称性を検証することを主な目標としており、反水素の 1S-2S や 1S-2P 遷移の測定、反水素のレーザー冷却、反水素に作用する重力の影響など、30 年以上も反物質研究をリードしている。私は ALPHA-3 という新型のトラップの計算とテストングに取り組んだ。ALPHA-3 は Penning トラップの壁にシリコン光電子増倍管 (SiPM) を直接埋め込み (図 2)、捕獲された反水素原子やベリリウム (Be) イオンの直接測定を可能にする。従来は反水素原子が磁気トラップを抜け出し Penning トラップの壁に当たり消滅する数を数えることでスペクトルを取っていたが、ALPHA-3 では磁気トラップに捕獲された反水素からの 121 nm 蛍光 (Lyman- α 線) を測定することで、いわゆる非破壊的な測定ができる。一方で、Be イオンは反水素の生成に使われる陽電子を冷却する為に使われるが、その 313 nm 蛍光 (2S-2P 遷移) の線幅を測定することで、温度を従来の方法より高い精度で推定することができる。



図 2: ALPHA-3 トラップのデザイン。中央が反水素生成のためのトラップ、その両端が陽電子冷却のためのトラップ。細矢印で示した箇所に反水素原子の蛍光を測定するための SiPM が、太矢印で示した箇所に Be イオンの蛍光を測定するための SiPM が設置される。

2.2.1 4 ケルビン下の SiPM 測定

メインプロジェクトとして、パルス管冷凍機で ALPHA トラップの温度 (4 K) まで冷却した SiPM のゲインの測

¹ワークショップへの登録リンクは過年度のものと同じだった。

定を任された²。セットアップの一部を図3に示す。

私の実験のために用意された冷却装置はこれまで4年間で一度も目標値の4 Kに到達したことがなく、過去に試みられた低温下のゲイン測定ではSiPMの信号はノイズに埋もれていた。冷却装置とコンピュータは1年以上手がつけられておらず、それらを再稼働し修復することが前提であった。

冷却器は楽観的に設計され、問題が起こる度に当てずっぽうに追加を施し続けたものだった。そのためモジュラリティが悪く、修復には時間がかかると感じたので、教授と交渉しALPHAの全員が課せられるシフト作業から特別に自分を外してもらい、冷却器の修復に時間を充てた。担当のポスドクやPhDは他のプロジェクトやミーティングを理由に私と関わろうとしなかったので、冷却器の修復やノイズ低減からSiPMデータの取得と解析まで専ら自分で行った。最後には、冷却器内の熱放射と信号線に生じる熱接触を適切に処理すると2.8 Kまで冷却できる事を証明した。熱接触を解決するための改造を行う時間は残っておらず、4 KにおけるSiPM測定はできなかったが、室温下のSiPMのゲイン測定は行い(図4)、今後のSiPM測定の冷却と測定の方針を具体的に示した。

一時期は苦しく感じたALPHA-3の冷却器の修復も、見方を変えれば熱の逃し方など低温実験に必要な技術を触れて学ぶ良い機会だった。また、ポスドクやPhDと波長が合わず衝突することもあったが、これは年長者に対し遠慮しがちだった私に意見を通す自信を持つことを教えてくれた。向こうが乗り気でない時も、期間内にプロジェクトを終わらせたいと強調することで、最後には協力してもらうことができた。相手を尊重し自身の意見も伝える、グループワークの基本を学ぶことができた。

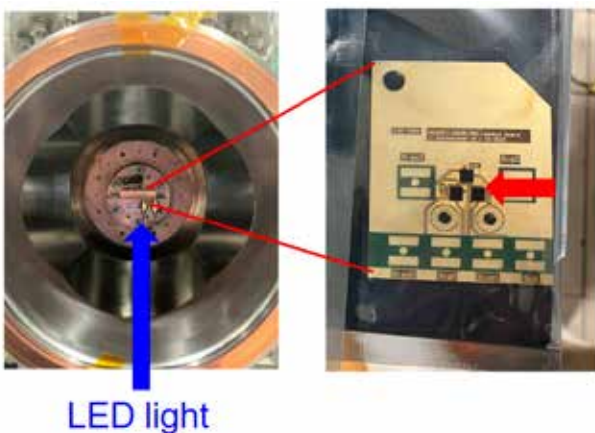


図3: SiPMのゲイン測定のセットアップ。右図のPCBにSiPMをはんだ付けし、左図の冷却器に取り付ける。下部のLEDから光を照射する。

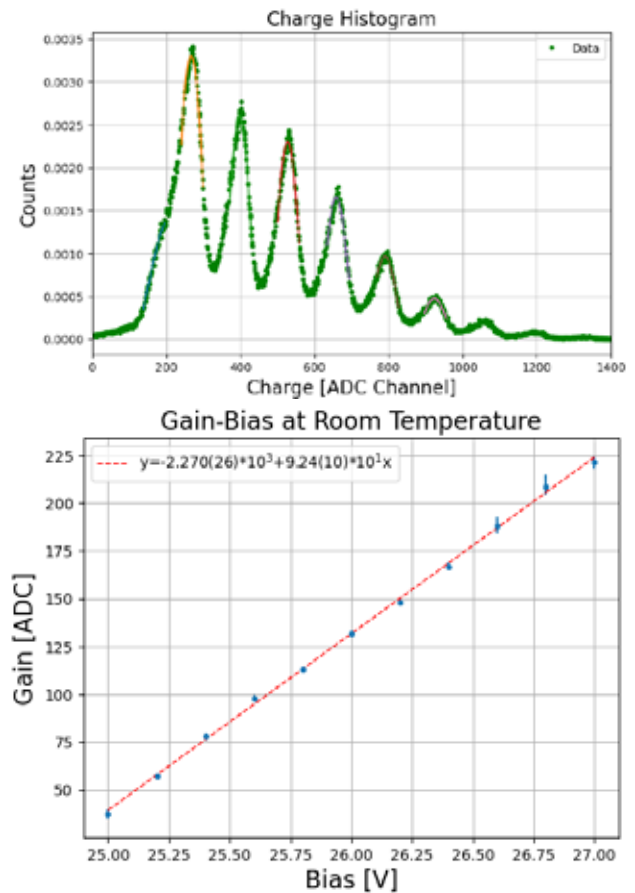


図4: Onsemi J-series 30035 SiPMのゲイン測定。(上)照射したLED光に対する電荷ヒストグラム。SiPMのゲインはピーク間の距離に対応する。(下)SiPMのゲインはSiPMに与えられるバイアス電圧に比例する。線形回帰線よりSiPMの降伏電圧値が推定される。

2.2.2 立体角計算

サイドプロジェクトとして、Penningトラップに捕獲されたBeイオンから発生する蛍光量の数値計算も任された。ALPHA-3のトラップは、Beイオンの強い蛍光によりSiPMが受けるダメージとSiPMによるトラップ電場への影響を最小限に抑えるため、6つのSiPMをPenningトラップ電極の外側に置き内側に小さな穴を開けた構造になっている(図5左)。SiPMに届く蛍光の総量はイオンの数 N 、イオンの放射率 P 、またイオンの位置から6つの電極穴への総立体角 σ の積になる。 N と P は簡単に求められるが、総立体角 σ はALPHA-3トラップの形状に大きく依存し解析的に得られない。そこで、私は総立体角を数値計算するコードを書いた。

計算では、トラップ内部の任意の位置を6つの電極穴それぞれを中心とする座標系に変換し、それぞれについて電極穴への立体角を計算し総和を取った。もし、BeイオンがSiPMから遠く離れてしまった際には電極穴を通過した蛍光がSiPMに届かず横の壁に当たり吸収されて

²詳細は英文報告書を参照: <https://cds.cern.ch/record/2907889>

しまうので、その効果も計算に入れた²。図5右は総立体角の分布の一例を示す。最後に、Penning トラップに捕獲された Be イオンのプラズマが楕円体に均一分布しているとし、モンテカルロ法による積分を行い総立体角の平均値を算出した。幾つかのプラズマ形状について算出された、総立体角の平均値を表1に示す。計算精度はこの程度で充分だと考えられる。冷却器の建築に加え、この結果を Student Session で発表した。

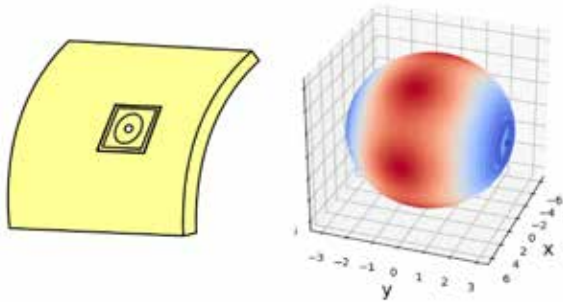


図5: (左) Penning トラップの一部。(デザインの詳細は論文になり得るため、スケッチでご容赦願いたい。) 外側に SiPM を置く四角い溝があり、内側に光を通す丸い穴がある。(右) Be イオンが分布すると仮定した楕円体領域の各点で計算した総立体角。赤が最大、青が最小。

表1: Be イオンの分布する楕円体領域の形状と、その領域全体で平均された立体角。立体角の値は $1/4\pi$ を掛けることで正規化されている。

長半径 [mm]	短半径 [mm]	平均立体角 [$\times 10^{-4}$]
3.00	3.00	5.36(1)
5.00	3.00	5.23(1)
8.00	3.00	4.78(1)
3.00	5.00	5.44(1)
5.00	5.00	5.24(1)
8.00	5.00	4.74(1)

3 CERN での生活

研究と違ってかわって、CERN での生活はとても楽しかった。私は滞在期間の全てを Foyer Schuman で過ごしたが、1 週間も経たずに生活に慣れ、滞在中の天気も素晴らしかった。週末になるとアジア諸国の summer student たちと一緒に料理した他、Chamonix, Grindelwald, Bern, Interlaken, Montreux などを旅行した(図6)。夏のスイスはどこもかしこも絶景であり、良い思い出になった。旅行を通して親しくなった友達とは、プログラムの終わった今でも頻繁に連絡を取り合っている。



図6: Grindelwald 近郊の Mt. First。

4 今後の抱負, プログラムに望むこと

Northwestern 大学で過ごした学部の間は、優秀な PhD 生の下で働いていたため、設備も与えられる仕事も土台が完成していた。一方で、ALPHA-3 で取り組んだプロジェクトを通して設備の構築から始めることの難しさを身をもって感じ、実験に関する理論の知識を十分身につける必要があると感じた。また、ハードウェアに翻弄されるうちに、直感で動いてしまう癖がついたのは即座に治さなければいけないと感じた。

配属されるグループと与えられるプロジェクトの質に大きく依存するが、私の場合 8 週間で結果を出すには苦労した。滞在期間の後半はハードウェアの作業が多く、時間の余裕がなかった。もう少し長く滞在できればもっと進められたかもしれないと思う。その一方で、メンバー国の summer student のように 12 週間も滞在すると中だるみを起こしそうなので、やはり例年の 9 週間が丁度良いのではないかと思う。

5 謝辞

このプログラムに参加するにあたり、沢山の方々にお世話になりました。推薦状を書いてくださった Northwestern 大学の Gabrielse 教授, ALPHA でも通用するハードウェア力を鍛えてくださった Xing Fan 先生と Benedict Sukra さん, 終始生意気だった私を受け入れてくださった ALPHA の皆様, また滞在期間をより良いものにするため尽力してくださった KEK の皆様に心から感謝申し上げます。特に、橋本優さんには私達のための歓迎会を開催して頂いた他、私が諸用のために始発電車で Bern に向かわなければいけない際に Geneva 駅まで送迎して頂きました。最後に、日本, 台湾, 香港, マレーシアから参加された summer student の皆さんと共に過ごすことができたおかげでとても楽しい 8 週間を過ごせました。ありがとうございました。