

KEK インターンシップ報告書

実習期間：2023 年 11 月 29 日（水）～12 月 1 日（金）

12 月 5 日（水）～12 月 11 日（月）

新潟大学理学部理学科 4 年 東琉都

1. はじめに

私は J-PARC MLF MUSE D1 実験エリアにて高偏極ミュオニックヘリウム生成実験に参加し、運動量 29-37 MeV/c で負ミュオンの崩壊電子数の測定、および効率よく負ミュオンが ^4He に束縛される負ミュオンの運動量を評価した。11 月 29 日から 12 月 1 日、12 月 5,6 日は実験準備、実験は 12 月 7 日から 12 月 10 日に行った。

2. 実験の目的

本実験の目的は高偏極状態のミュオニックヘリウムの生成であり、実習目的は実験に使用するビーム運動量の決定である。

高偏極状態のミュオニックヘリウムの生成はミュオニックヘリウム超微細構造の測定精度向上を目指した取り組みである。ミュオニックヘリウム超微細構造の測定精度はミュオニックヘリウムの偏極率と相関する。

2.1. ミュオニックヘリウムとは

ミュオニックヘリウムは、ヘリウム原子の一つの電子がミュオンという重い素粒子に置き換わったエキゾチック原子を指す。100 %偏極した負ミュオンを利用して生成したミュオニックヘリウムであっても偏極率は 5 %程度まで低下してしまう。

2.2. 超微細構造とは

超微細構造は、原子内の核スピンと電子のスピン間の相互作用によって生じる、原子のエネルギー準位の微細な分裂のことである。

2.3. ミュオニックヘリウムの超微細構造の測定意義

ヘリウム原子 (^4He) から生成されるミュオニックヘリウム原子 ($^4\text{He}\mu^-e^-$) は、原子核のスピンが 0 であるため、基底状態の超微細構造はミュオン μ^- と電子 e^- のスピン相互作用から生じる。ミュオニウムは標準模型において純粋な二体系であるのに対し、ミュオニックヘリウム原子はミュオンがヘリウム原子核の周りに偏在する三体系である。これによりミュオニックヘリウム原子の超微細構造はわずかにミュオニウムと異なる。ミュオニックヘリウム原子の超微細構造の精密な測定は量子三体系の理論の検証や負ミュオンの質量の決定につながる。

2.4. ビームタイム

ビームタイムは 12/7 ~ 12/10 の 4 日間であった。運動量 29-37 MeV/c で負ミューオンの崩壊電子数の測定、および効率よく ^4He を束縛する負ミューオンの運動量を評価した。運動量の評価後、レーザーの偏光状態を左円偏光、直線偏光、右円偏光とし、各状態でミューオニックヘリウムの偏極率の時間変化と温度依存性を測定した。

3. 実験の原理

3.1. レーザーを使用した偏極ミューオニックヘリウムの生成

ミューオンビームを使用し、ミューオニックヘリウムを生成する。以下はその手順である。

1. ルビジウム (Rb) を加熱し、気化させる。
2. ミューオンビームを照射し、ミューオニックヘリウムを作り出す。
3. レーザーを使い、「光ポンピング」によって Rb を偏極させる。

ここで光ポンピングとは特定の状態への選択的励起と脱励起を繰り返し、原子の状態を特定の準位に集中させる技術である。

Rb とのスピン交換によってミューオニックヘリウムも偏極し、その結果負ミューオンも偏極する。負ミューオンは崩壊時スピンと反平行な方向に電子を放出することが多い。そのためスピンと平行な方向と反平行な方向に放出された電子をそれぞれ数えることで、負ミューオンの偏極率を測定できる。

3.2. 電子の個数と運動量の関係

今回の実験では負ミューオンの崩壊電子数を測定し、運動量を最適化した。運動量の評価には負ミューオンの性質を利用する。原子核に束縛された負ミューオンは崩壊の他に核捕獲によっても減少し、見かけ上寿命が短くなる。

したがって負ミューオンの崩壊電子の時間スペクトルを各原子核に束縛された負ミューオンの寿命の関数で Fit すれば、負ミューオンがどの原子に捕獲された数が推定できる。

4. セットアップ

本章では実験のセットアップについて解説する。

4.1. J-PARC MLF MUSE D1 実験エリア



図 1 J-PARC の航空写真

本実験は J-PARC MLF MUSE D1 実験エリア (J-PARC: Japan Proton Accelerator Research Complex, MLF: Materials and Life Science Experimental Facility) で行った。J-PARC は、日本の茨城県東海村に位置する大強度陽子加速器施設である。この施設の中核を成す MLF では、多様な実験に使用される中性子ビームとミューオンビームが生成される。ミューオンは、加速された陽子が炭素標的に衝突し、核破砕により生じる π 中間子が崩壊して生成される。

J-PARC では、陽子を高エネルギーまで加速し、標的に衝突させて様々な粒子を生成する。陽子ビームは同期加速器を通じて加速される。同期加速器は、磁場と電場を用いて陽子を一定の軌道上で加速し、そのエネルギーを増加させる。この加速プロセスは、25 Hz 周期的に変化する電場に同期して行われるため、ビームはパルス形状を取る。

また J-PARC においてのパルスとビーム量の相関はキッカー電磁石も関係している。

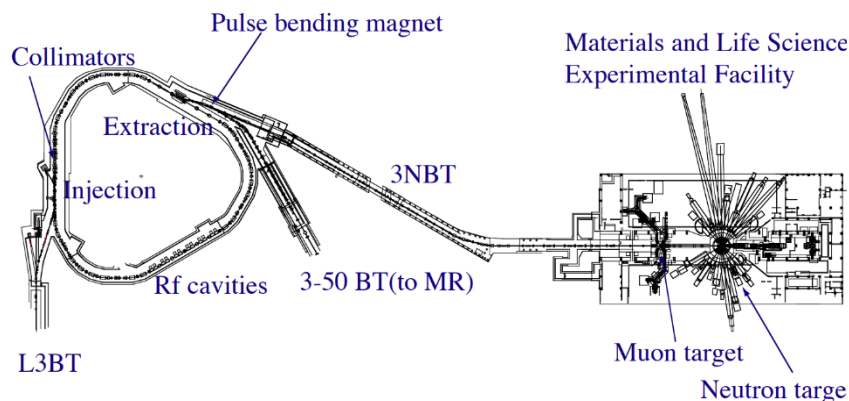


図 2 RCS および MLF の平面図[1]

図 2 に示す通り、MLF では RCS からビームを取り出す。ビームの取り出しでは、高速

の立ち上がり時間を持つキッカー電磁石を用いて、周回軌道を回っているすべてのバンチ（RCS の場合は最大 2 バンチ）を 1 度にキッカーで励磁する。

キッカーの励磁は 25 Hz の周期で行われ、そのため取り出したビームも 25 Hz の周期となる。

4.2. 全体図

本実験で使用する D1 エリアの検出器の全体図を図 3、図 4 に示す。

ミュオンビームは図 3 のように入射し、その反平行の向きから枠線黄色のようにレーザー照射装置を設置しレーザーを照射する。

安全面を考慮し、検出器とレーザーは暗室で覆う。

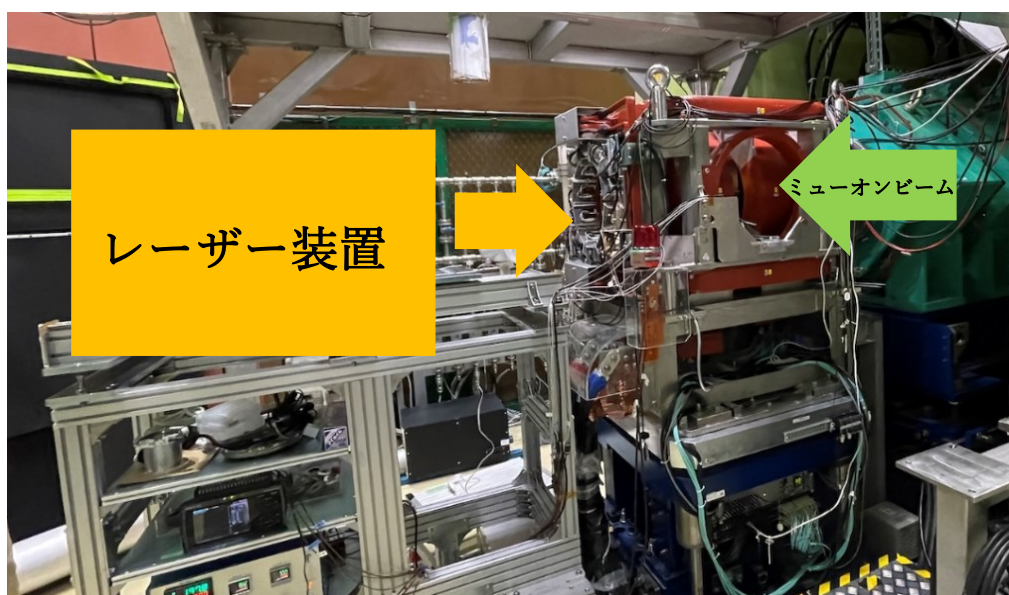


図 3 検出器（全体図）、黄枠にレーザー装置が置かれ黄色矢印の方向に入射する。
また緑矢印の方向からミュオンビームを入射する。

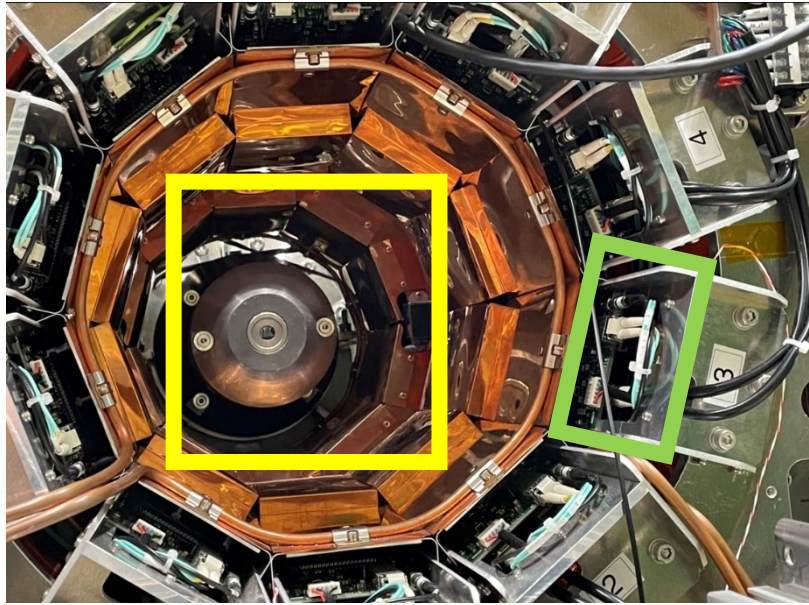


図 4 検出器（ビーム下流）

黄枠線内部にガラスセルを設置しビームを入射する。緑枠線は検出器で円形に配置されており下流側に 10 個上流側に 10 個で計 20 個配置されている

4.3. 実験に使用する器具

4.3.1. ガラスセル

本実験ではミュオニックヘリウムを生成するために、ヘリウムと少量の Rb の入ったガラスセルを使用する。ミュオニックヘリウムの生成効率を高めるため、ガラス中に停止する負ミュオンの数を可能な限り減らす必要がある。本実験では負ミュオンの透過率を高めるため、ミュオンビームが透過する部分は厚さ 0.5 mm、それ以外の部分も厚さ 1 mm と、非常に薄いガラスセルを使用した。

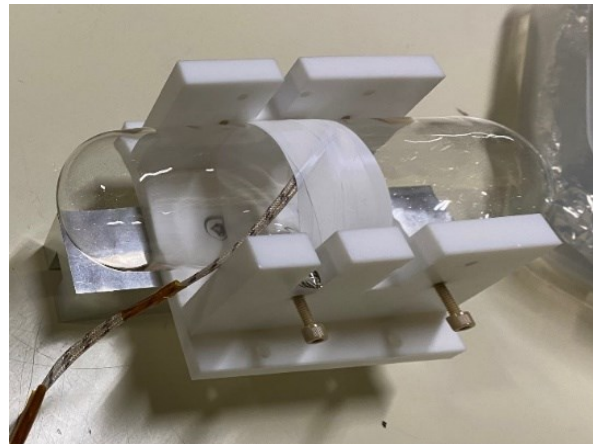


図 5 実験で使用するガラスセル

4.3.2. オーブン

オーブンは、ガラスセルを約 200 度に加熱し、内部の Rb を気化するために使用する。この装置は、再偏極のために不可欠な要素である。

4.3.3. レーザー装置

本実習の後に行われたミュオニックヘリウムの再偏極実験では、円偏光レーザーをガラスセルに照射し、アルカリ金属原子を偏極する。

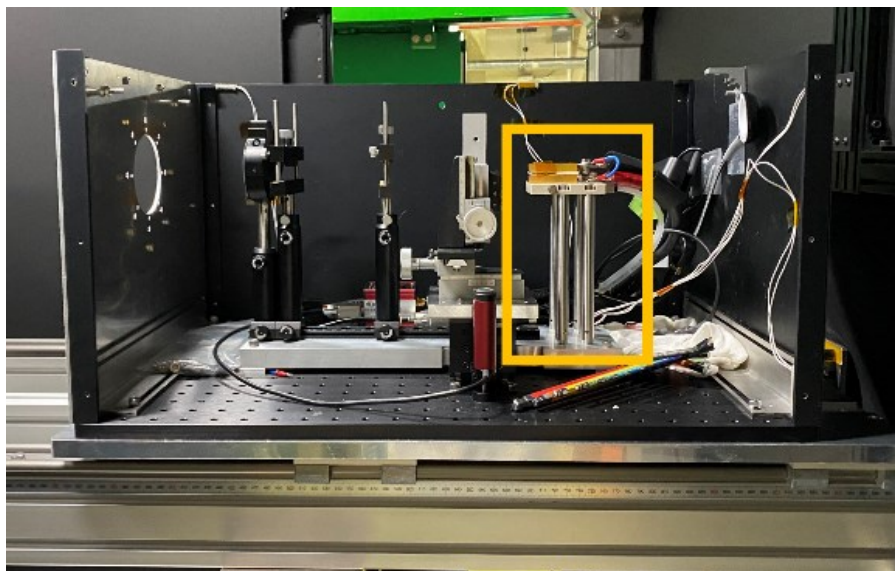


図 6 レーザーのセットアップ (枠線:レーザー照射用の素子)

図 6 のセットアップでは、左円偏光を照射するとビームライン下流方向に偏極し、右円偏光を照射するとビームライン上流方向に偏極する。また、直線偏光を照射した際には無偏極状態になる。

こうしてレーザーの偏光方向を変えることで、実験の条件を調整し、対照実験をする。

4.3.4. 検出器

崩壊電子の検出には図 7 に示す装置を使用する。

シンチレーターの発光を MPPC(SiPM)で増幅しその信号を解析することによって崩壊電子数を測定する。

SiPM の読み出しには、KEK の Open-It(Open Source Consortium of Instrumentation) グループが開発した Kalliope(KEK Advanced Liner and Logic board Integrated Optical detector for Positron and Electron)(図 8)を使用する。Kalliope は ASIC として開発されたアナログ信号回路 VOL- UME2012 と、FPGA を含んだデジタル回路の組み合わせからなり、増幅した SiPM の信号をデジタル回路で読み出す[3]。デジタル回路の FPGA には時間分解能 1 ns の Time-to-Digital Converter(TDC) が実装されている。TDC の時間窓は $64 \mu\text{s}$ であり、これはミュオンの寿命 $2.2 \mu\text{s}$ よりも十分長く、J-PARC のビームのパルス間隔 25 ms よりも十分短い。

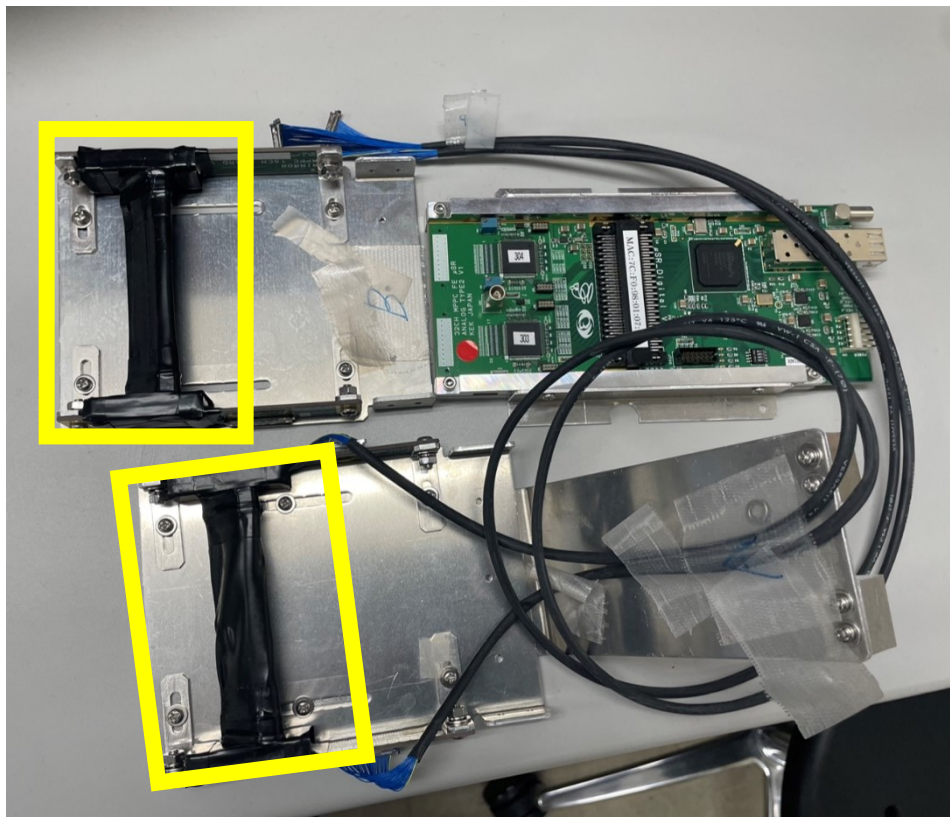


図 7 Kalliope Board(枠線がプラスチックシンチレーター)
プラスチックシンチレータの発光を、ASIC でデジタルパルスに成形し、
FPGA で時間情報を整形して、光イーサネットで PC に送る



図 8 Kalliope を上からみた図

5. 実験概要

5.1. ヘリウム原子核に束縛されたミュオン数の推定

D1 実験エリアの分光器に備え付けられているヘルムホルツコイルが作る 15 G の磁場中に、室温で 3 気圧の ^4He ガスと 0.1 mg の Rb を封入したガラスセルを設置する。磁場中に置くことで量子化軸を決める。そしてガラスセルに負ミュオンビームを照射する。運動量が高すぎたり低すぎたりすると、 ^4He 原子ではなくガラスに捕獲されてしまうため、 ^4He 原子に束縛される負ミュオンの量が最大となるようにビーム運動量を最適化する。今回の測定条件では負ミュオンの寿命の減少は、今回測定したい ^4He の寄与、ガラスの構成要素である二酸化ケイ素から O、Si 等の寄与が考えられる。その場合の寿命はそれぞれ He が 2195.31 ns, O が 1796 ns, Si が 758 ns である [1]。これらを利用して崩壊スペクトルを下式で Fit して原子核に束縛された負ミュオンの量 $N(t)$ を推定する。

$$N(t) = \frac{N_{\text{He}}}{2195.31} (e^{-(t-7600)/2195.31}) + \frac{N_{\text{O}}}{1796} (e^{-\frac{t-7600}{1796}}) + \frac{N_{\text{Si}}}{758} (e^{-\frac{t-7600}{758}}) + BG$$

ここで $N_{\text{He}}, N_{\text{O}}, N_{\text{Si}}$ はそれぞれ、ミュオンがヘリウム、酸素、ケイ素、に束縛された負ミュオンが崩壊して生じた電子の数であり、BG はバックグラウンドである。

また本実験で得られる崩壊スペクトルの例を図 9 に示す。

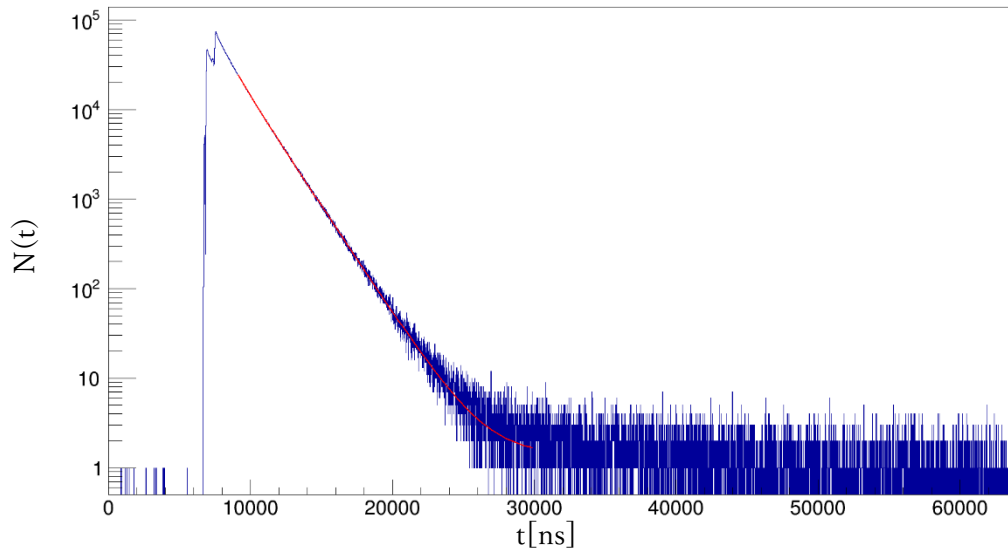


図 9 崩壊スペクトルの fit の一例。

崩壊電子数の測定には分光器に備え付けられている検出器を使用する。

5.2. 運動量スキャン

5.1 節で述べた通り ^4He 原子に束縛される負ミュオンの量が最大となるようにビーム運動量を最適化する必要があるため、事前に用意されていたデータセットを用いて 29-37 MeV/c の範囲で 30 分ほど測定を行い、そこから得られた各時間で崩壊したミュオンが

放出した電子の数をプロットし、それを fit したもので評価した。

Fit 時の評価の基準としてはパルス量、つまり総ビーム量に対して、ヘリウムがミュオンを束縛し、その後、崩壊したミュオンが放出した電子の数 $N_{He}/pulse$ と N_{He} と N_O, N_{Si}

の和の比率 $S/N = \frac{N_{He}}{N_O + N_{Si}}$ を用いて FOM (Figure of Merit) を $S/N \times N_{He}/pulse$ と定義し、評価し

た。これは N_{He} を計測中の総パルス量で割れば 1 pulse 毎の N_{He} の値が分かり、これにより各運動量での N_{He} の値をより正確に評価することができる。また N_{He} と N_O, N_{Si} の和の比率 S/N を用いて負ミュオンがほかの原子ではなくどれだけ 4He 原子に束縛されているかを評価している。

6. 実験結果

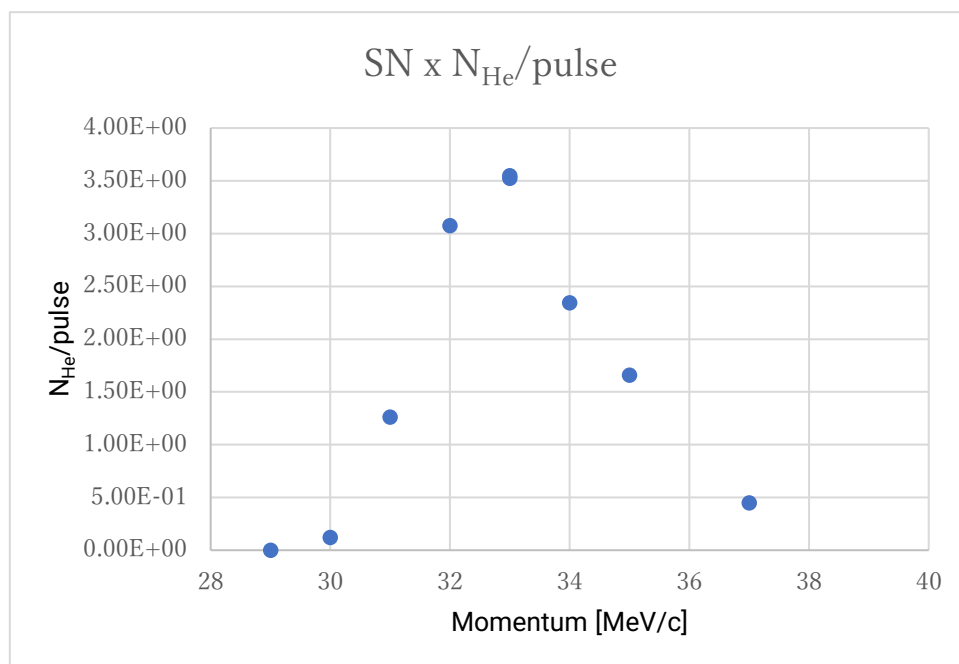
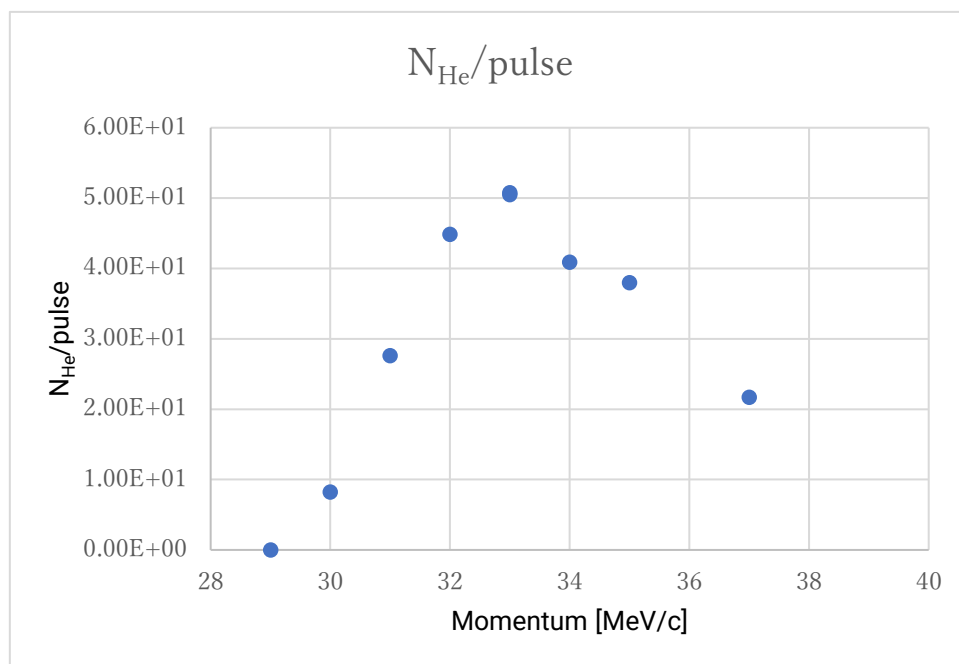
6.1. 実験結果

29-37 MeV/c の運動量を測定し、33 MeV/c 時の $N_{He}/pulse$ が一番高く、 $S/N \times N_{He}/pulse$ の値も高かったため 33 MeV/c の計測は 2 回行っている。

以下はその結果である。

Momentum	N_{He}	$N_{He}/pulse$	N_O	N_{Si}	S/N	$S/N \times N_{He}/pulse$
29	4.16E-05	1.00E-09	1.93E+07	1.09E+06	2.05E-12	2.05E-21
30	2.44E+05	8.25E+00	1.57E+07	8.15E+05	1.48E-02	1.22E-01
31	1.56E+06	2.76E+01	3.25E+07	1.70E+06	4.56E-02	1.26E+00
32	2.18E+06	4.49E+01	3.03E+07	1.60E+06	6.85E-02	3.07E+00
33(1 回目)	2.13E+06	5.08E+01	2.90E+07	1.50E+06	6.99E-02	3.55E+00
33(2 回目)	1.96E+06	5.05E+01	2.67E+07	1.32E+06	6.98E-02	3.52E+00
34	1.57E+06	4.09E+01	2.61E+07	1.30E+06	5.73E-02	2.34E+00
35	1.23E+06	3.80E+01	2.69E+07	1.36E+06	4.37E-02	1.66E+00
37	8.98E+05	2.17E+01	4.13E+07	2.08E+06	2.07E-02	4.49E-01

また $N_{\text{He}}/\text{pulse}$ と $\text{S/N} \times N_{\text{He}}/\text{pulse}$ をそれぞれ横軸運動量でプロットしたものが次のグラフになる。



FOM からその後の測定では、ミューオンビームの運動量は 33 MeV/c を選択した。

7. インターンシップのまとめ

今回 KEK 加速器科学インターンシップではたくさんの方の協力を得て加速器実験に触れる機会、また実際に研究者の方々にお話しさせていただく機会をいただき、施設の案内などもしていただきました。このような機会は普段では経験できない貴重な体験であり、自分の中での加速器実験への理解が深まっただけでなく、実習内容だけではなく実験準備、測定、解析など実験全体に参加したことで実験のノウハウなども得ることが出来ました。これらは自身が将来研究をしていく上での自信につながっただけではなく、より見通しがつきました。

この経験を今後研究に活かしていきたいです。

8. 謝辞

実際にビームを扱ってデータを測定し、そのデータを解析させていただけるという貴重な体験をさせていただきありがとうございました。加速器科学インターンシップの受け入れ担当教員になっていただいた物質構造科学研究所 下村 浩一郎 教授をはじめとする J-PARC の皆様に、この場をお借りして深い敬意と感謝を示し、お礼申し上げます。今後はこの貴重な体験を生かし、より一層加速器実験への理解を深めていけたらと考えています。

9. 参考文献

- [1] 「J-PARC 加速器の概要」 OHO-10, <http://accwww2.kek.jp/oho/OHOtxt4.html>
- [2] D.F. Measday et al, Elsevier Science B.V.(2001)
295, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0370157301000126>
- [3] K M Kojima, T Murakami, Y Takahashi, H Lee, S Y Suzuki, A Koda, I Yamauchi, M Miyazaki, M Hiraishi, H Okabe, S Takeshita, R Kadono, T Ito, W Higemoto, S Kanda, Y Fukao, N Saito, M Saito, M Ikeno, T Uchida, and M M Tanaka. New μ sr spectrometer at j-parc muse based on kalliope detectors. Journal of Physics: Conference Series, Vol. 551, No. 1, p. 012063, dec 2014.,