

# 加速器科学インターンシップを利用した卒業研究 ～J-PARC MLF でのミュオン崩壊測定～

京都大学理学部

阿部 優史 池満 拓司 小田川 高大\* 田島 正規

羽田野 真友喜 早川 龍 三野 裕哉

指導教員：中家 剛 隅田 土詞 \*\*

TA：関 繁人 赤塚 駿一 野口 陽平 安留 健嗣

\* odagawa.takahiro.57w@st.kyoto-u.ac.jp \*\* toshi@scphys.kyoto-u.ac.jp

2018 年(平成 30 年)5 月 2 日

## 1 はじめに

今回われわれは、2017 年度の卒業研究として J-PARC MLF(物質・生命科学実験施設) のミュオンビームを用いたミュオン崩壊の測定を行った。その際、加速器科学インターンシップという制度から旅費を補助していただくことができ、また J-PARC  $g - 2/EDM$  実験のビームプロファイルモニタリング(BPM) グループのテストビームを利用していただけたことで、学部生実験としてはかなり高度な測定まで踏み込めた。各大学の教員や学生の方々に、このような機会があることを知っていたくだくことは非常に有意義であると考え、この談話会記事で報告させていただく。

この記事の執筆は 1, 2, 6 節を教員が、3–5 節の実習内容と実験結果については卒業研究を行った京都大学の学生が担当した。

## 2 加速器科学インターンシップ

高エネルギー加速器研究機構は、大学学部 3 年生以上を対象とした加速器科学インターンシップ [1] を実施している。これは、加速器のビームを用いた実習を通して大学等の研究室では得られない経験を学部学生にもらい、学生に加速器科学への興味を持ってもらうことを目的としている制度である。応募方法などの詳細については URL を見ていただくとして、採択されれば基本的には KEK や J-PARC までの交通費とドミトリーや宿泊費が支給されることになる。

通常、学部生が加速器を用いた実験を行いたいと思っても、施設側の受け入れ態勢がすぐには整わないこと、テスト実験専用のビームラインがないため PAC など

での申請は非常にハードルが高いこと、それらによってビームタイムも限られていることなどの理由で難しいことが多い。さらに学部学生の卒業研究の実験では、予算が限られているため実験機器の購入と遠方での実験遂行の両方を行うのは難しい。

KEK と J-PARC では学部相当の「実習生」を受け入れている [2]。このインターンシップは、学生が自ら提案した実習テーマに基づき、加速器の開発や運転を含む実習を行うことを奨励するもので、加速器や素粒子実験などについて、学生がアイデアを出して実験を行うことができる。

今回は  $g - 2$  グループの測定にパラサイトして実験を行うことを受け入れていただき、測定が実現することになった。また特に京都大学では、4 年生の卒業研究グループが大学院の研究室とは独立であるため、指導教員が所属する研究室の運営費交付金や科研費では旅費の捻出が難しかった面もあり、今回補助を受けられたのは非常にありがたかった。

## 3 J-PARC MLF ミュオンビームライン

MLF では J-PARC RCS の 3 GeV 陽子ビームを用いて生成した世界最高強度のミュオン・中性子ビームを用いてさまざまな研究を行っている。RCS は 25 Hz サイクルで運転されており、シングルバンチまたは各パルスに 600 ns 間隔で 2 バンチの入ったダブルバンチモードでの運転が可能である。ミュオン D2 ビームラインとよばれるビームラインでは、表面ミュオンまたは 50 MeV/c までの正・負ミュオンを利用することができます [3, 4]。

今回われわれは、シングルバンチの表面ミュオンビームを用いて実験を行った。

J-PARC MLF におけるミュオンビームの発生方法を簡単に述べる。炭素原子核に J-PARC RCS からの 3 GeV 陽子ビームを衝突させることで発生した荷電  $\pi$  中間子から目的に応じた電荷、およびエネルギーのものを選び出し、その後  $\pi$  中間子が超伝導ソレノイド磁石を通過する間に崩壊することでミュオン ( $\mu$ ) が生成する。この  $\mu$  をさらに電荷・エネルギーで選別することで必要なミュオンビームを得る。一方表面ミュオンビームであるが、発生した  $\pi^+$  のうち標的表面で静止したものが崩壊すると  $\mu^+$  が発生する。この  $\mu^+$  は 100 % のスピン偏極をもち、エネルギーは 4.1 MeV である。また、このとき同様に静止する  $\pi^-$  については原子核に捕獲されて取り出すことはできない。この 4.1 MeV の  $\mu^+$  をさきほどと同じように選択することで表面ミュオンビームを得る。

## 4 実験について

今回われわれは表面ミュオンビームを用いて以下のような実験を行った。

- 崩壊寿命の測定

$\mu^+$  は  $\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e$  という崩壊を起こすが、この崩壊は弱い相互作用によるものであり、 $\mu^+$  の崩壊寿命を測定することによって弱い相互作用の結合を調べることができる。今回の実験ではビーム由来の  $\mu^+$  を標的中で静止させ、そこから放出される  $e^+$  を検出した時間情報から崩壊寿命の測定を行った。

- $g$  因子の測定による Dirac 方程式の確認

粒子のスピンと外部磁場との相互作用を特徴づける因子を  $g$  因子とよび、標準模型、または Dirac 方程式によれば、スピン 1/2 のレプトンは摂動の最低次で  $g = 2$  という値を持つ。今回は一様な磁場を印加した標的中で  $\mu^+$  を静止させ、放出される  $e^+$  を検出した時間情報からスピンの歳差運動を解析して  $g$  因子の測定を行った。

- ミッシェルパラメータの測定による弱い相互作用の四点相互作用の形の決定

$\mu^+$  の崩壊によって放出される  $e^+$  のエネルギースペクトルは式(1)のような形で表され、ミッシェルパラメータとよばれる幾つかのパラメータによって特徴づけられる。

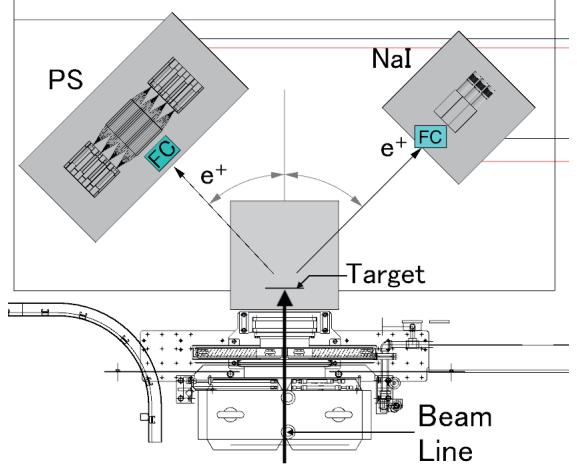


図 1: 寿命測定のセットアップ。ビーム出口の前に標的を設置し、NaI および PS で標的中で崩壊して出てきた  $e^+$  を検出する。フィンガーカウンター (FC) を検出器中心に設置して、 $e^+$  の立体角を制限している。

$$\frac{d\Gamma}{x^2 dx d(\cos \theta)} \propto (3 - 3x) + \frac{2}{3} \rho (4x - 3) \\ + \xi \cos \theta \left[ (1 - x) + \frac{2}{3} \delta (4x - 3) \right] \quad (1)$$

ここでたとえば  $\rho$  は弱い相互作用の形によって 0, 0.75, 1 のいずれかを取ることがわかっており、標準模型ではベクトル型相互作用を表す  $\rho = 0.75$  である。また、 $\xi$  はパリティの破れに関する係数であり、同じく標準模型では最大の破れを表す  $\xi = 1$  である。今回の実験では  $\mu^+$  の崩壊によって放出された  $e^+$  のエネルギーを測定し、そのスペクトルからミッシェルパラメータを求め、弱い相互作用の形を決定した。

### 4.1 セットアップ

上述の諸量を測定するために図 1 のようなセットアップで実験を行った。ビーム出口付近の架台上に、固定した銅板標的を設置し、そこで静止した  $\mu^+$  が崩壊したときに生成する  $e^+$  を NaI シンチレータ (NaI) およびプラスチックシンチレータ (PS) で検出した。各シンチレータ前には立体角の制限のためにプラスチックシンチレータのカウンターを設置した (図 1 中の “FC”)。 $g$  因子やミッシェルパラメータの測定の際には同様のセットアップで、磁場印加した標的に変更し測定を行った。

### 4.2 検出器

上述のように、今回は NaI および PS の二種類の検出器を用いた。

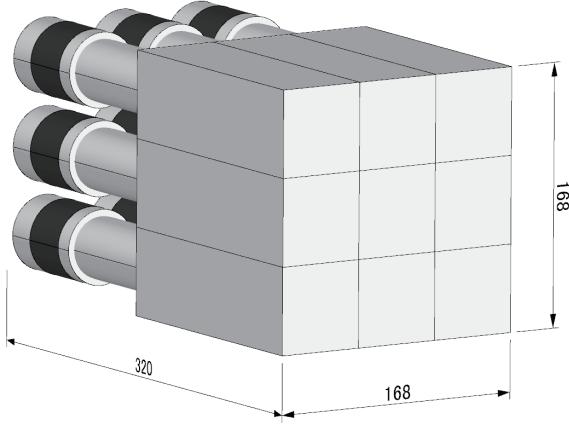


図 2: NaI シンチレータ検出器。9 個の結晶からなり、それぞれの結晶に PMT が接続されている。

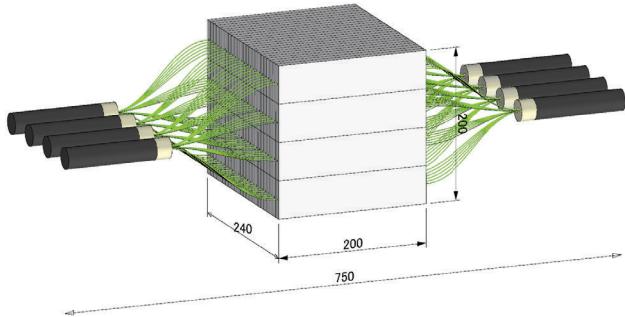


図 3: プラスチックシンチレータ検出器。4 層からなり、各層が波長変換ファイバーによる両端読み出しになっている。

#### NaI シンチレータ

図 2 のように  $5.6 \text{ cm} \times 5.6 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$  の結晶を  $3 \times 3$  個並べ、電磁シャワーをもらさず  $e^+$  のエネルギー測定を行うのに十分な体積を確保した。また、中心付近にきた粒子を識別するために図 1 のようにフィンガーカウンター (FC) を設置した。NaI シンチレータはエネルギー分解能に優れ、特にミッシェルパラメータを求めるための崩壊  $e^+$  エネルギースペクトル測定に用いた。

#### プラスチックシンチレータ

図 3 のように  $1 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$  のプラスチックシンチレータ板を組み合わせて縦横 20 cm、奥行 24 cm の体積とした。各板にファイバーを通したのち厚さ 6 cm ごとにまとめたものを 4 層作成し、それらを重ねた。プラスチックシンチレータは時間分解能に優れ、特に崩壊寿命、および  $g$  因子の測定に用いた。

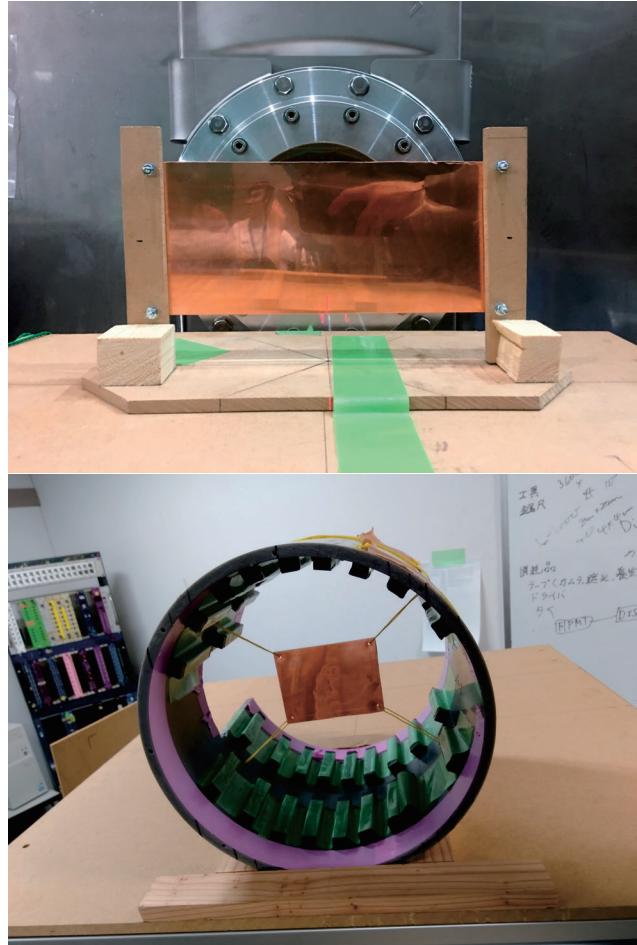


図 4: 銅板標的 (上) および磁場印加標的 (下)。写真では磁場印加標的の永久磁石が数か所外れてしまっているが、実験中は対称に永久磁石が設置されていた。

### 4.3 DAQ システム

データ取得においては、波形をそのまま記録できる Waveform Digitizer (CAEN V1721 および DT5725, 以下 WFD) を用いた。得られた波形は測定結果の節で示す。また、波形記録のトリガーについては、J-PARC RCS バンチ信号を遅延させたものを用いた。

### 4.4 標的

崩壊寿命と  $g$  因子、およびミッシェルパラメータの測定のために二種類の標的を作成した。

#### 銅板標的

$0.6 \text{ mm} \times 280 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$  の銅板を木枠に固定し、ビームラインが銅板中心にくるように設置した。

#### 磁場印加標的

呼び径 200 mm 厚さ 9 mm の塩化ビニルパイプの内側にフェライトの永久磁石を設置し、パイプに対して垂直方向の一様磁場を生成した。その中心に

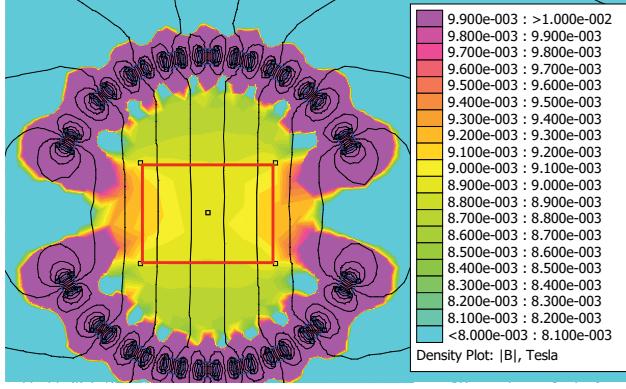


図 5: FEMM を用いた磁場シミュレーション。赤線の四角で囲まれた領域が銅板に対応しており、領域内で磁場がほぼ一様であることが確認できる。

$0.6 \text{ mm} \times 80 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$  の銅板を設置しビームラインが銅板中心にくるように設置した。標的中心での磁場の値は 54.61 Gauss であり、ビームプロファイルデータのガウシアンで加重平均を取った磁場の値は 53.97 Gauss であった。

磁場印加標的において、鉛直方向に一様な磁場を生成する原理について簡単に説明する。一般に加速器などで用いられる  $\cos\theta$  卷電磁石の電流分布を、永久磁石の分布密度に応用することでパイプを貫くような一様磁場を生成した。図 5 は上述のように磁石を設置したときの磁場を有限要素法シミュレーションソフト (FEMM) を用いて計算したものである。パイプの中心付近に 1 % 程度で一様な磁場が形成されていることが確認できる。

## 4.5 実験スケジュール

実験スケジュールは以下のとおりであった。

- 2/25：東海村に移動。安全講習や事前準備。
- 2/26 - 27 :  $g - 2$  実験 BPM グループの測定中にセットアップの確認や測定準備。
- 2/28 : 磁場印加した標的を設置し、測定を開始。最終的には 5 時間分のデータを取得。
- 3/1 : 標的を銅板標的に変更して 1 時間分のデータを取得。

## 4.6 測定結果

WFD で得られた波形データは図 6 のようになった。

図 6 のようなデータから陽電子のエネルギーや検出時刻を測定し、目的とした三つの物理量についてそれぞれ求めた。以下に簡単に各量についての解析結果をまとめた。

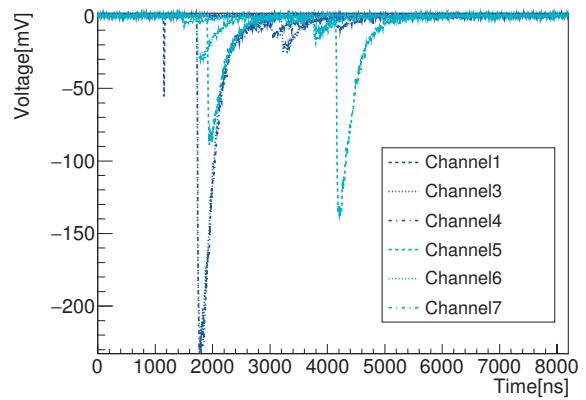


図 6: WFD で得られた波形データ。上が NaI の信号で下が PS の信号。

### 崩壊寿命

崩壊寿命は銅板標的を設置した状態で取得した PS のデータを用いて求めた。ここで時間原点  $t_0$  は WFD のトリガー信号が入力された時間を用いた。PS の一層目と四層目のコインシデンスを要求することで、PS を突き抜けたイベントを選択し、得られたデータに式 (2) で表される関数でフィッティングを行った。

$$f(t) = A \exp(-t/\tau) + \text{const.} \quad (2)$$

フィッティング結果は図 7 のようになり、寿命としては  $\tau = 2150 \pm 46 \text{ ns}$  という値を得た。

### $g$ 因子

$g$  因子については磁場印加標的を設置した状態で取得した PS のデータを用いて求めた。崩壊寿命と同様のイベント選択を行ったうえで、得られたデータに式 (3) で表される関数でフィッティングを行ったところ、図 8 のようになった。

$$g(t) = A \exp(-t/\tau) [1 + B \cos(\delta + \omega t)] + \text{const.} \quad (3)$$

得られた  $\omega$  とビームプロファイル加重平均を取った磁場  $B_0 = 53.97 \text{ Gauss}$  をもちいて  $g = 2m_\mu\omega/eB_0$

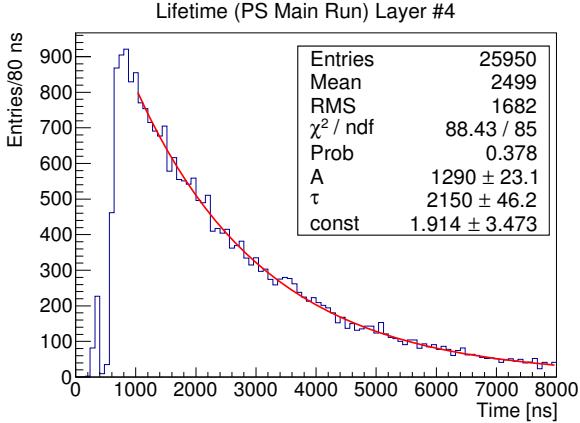
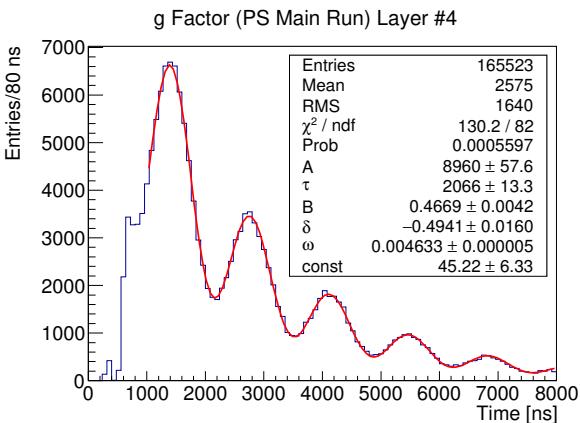


図 7: 崩壊寿命フィッティング結果。

図 8:  $g$  因子フィッティング結果。

という関係式から  $g$  因子を求めるとき、 $g = 2.017 \pm 0.009$  (stat.)  $\pm 0.017$  (syst.) という値を得た。ここで系統誤差はビームプロファイルの不確かさに起因する磁場の不定性によるものである。したがって、 $\mu^+$  がスピン  $1/2$  の Dirac 方程式に従う粒子であることが確認できた。

#### ミッセルパラメータ

ミッセルパラメータは磁場印加標的を設置した状態で取得した NaI のデータを用いて求めた。検出器中心の FC を通過したうえで、さらに中心に設置された NaI シンチレータに半分以上のエネルギーを落としたデータを  $\mu^+$  のスピンの歳差運動 3 周期分に限って用いた。得られたエネルギースペクトルにフィッティングを行うと図 9 のような結果が得られ、ミッセルパラメータとして  $\rho = 0.66 \pm 0.02$  (stat.)  $\pm 0.14$  (syst.) という値を得た。ここで系統誤差はエネルギースペクトル再構成の解析手法によるものである。この結果から弱い相互作用がベクトル型相互作用であることを確認した。また、 $\xi = 0.983 \pm 0.017$  となったのでパリティは最大限に破れており、 $V - A$  理論であると決定した。

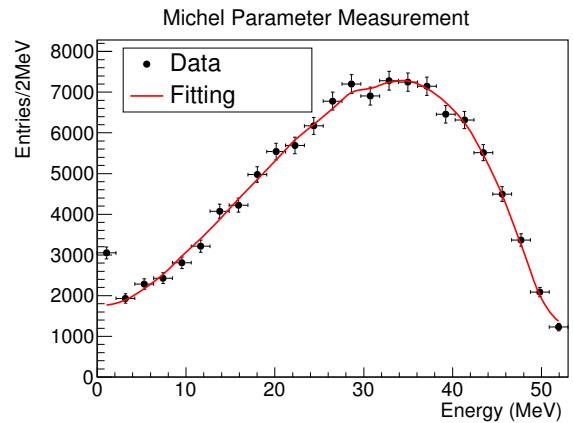
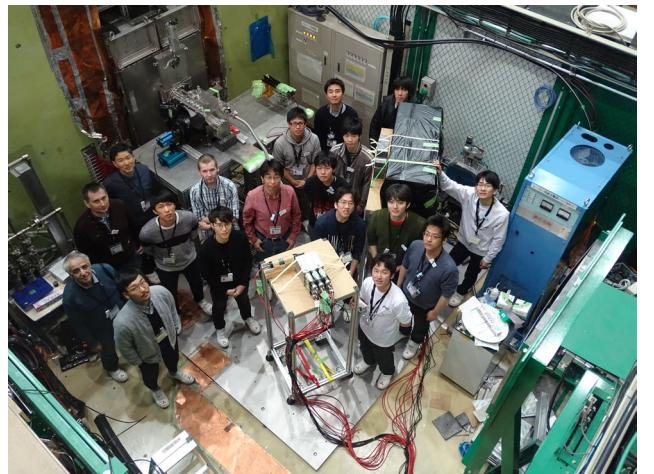


図 9: ミッセルパラメータフィッティング結果の一例。

## 5 まとめ

今回、加速器科学インターンシップという機会を通して、学部生ではめったにできないような貴重な体験をたくさんすることができた。加速器を用いた実験の中で、実際にはどのようなプロセスでビームを調節したり機器やケーブルを設置したりして実験を行っているのかというその端緒を見ることができた。また実験準備やセットアップ確認を通して、実験全体を見えた大局的な事前準備の必要性を痛感した。このような機会はその後の研究生活にとっても非常に有益なものであると思うので、他の学部生のみなさんにもぜひ積極的にこの加速器科学インターンシップを活用することをおすすめしたい。

実験結果に関しては、宇宙線を用いた実験ではなかなか鮮明には見えないスピンの歳差運動をはっきりと確認することができたのが印象的であった。また、崩壊寿命やミッセルパラメータについても予想していたような結果を得ることができた。

図 10:  $g - 2$  実験 BPM グループの皆さんとの集合写真。

## 6 おわりに

上と繰り返しになるが、学部生の実験でよく行う宇宙線を用いた  $g$  因子の測定では、振動の様子を確認するのに心眼が必要になることがよくある。加速器での実験、とくに MLF のミュオンビームでは、大統計に加えて 100 % の偏極が得られていることがとても大きく、教員も自分では今まで見たこともないような綺麗な振動が見え、系統誤差の考察などの高度な内容まで到達することができた。

テストビームの日付が決まっていると準備は大変になるが、それに向かって学生が団結して頑張り、みるみる成長していく様子が見てとれたので、その意味でも今回の実験は非常に有意義であったと思う。

最後になりましたが、J-PARC MLF で学部生実験を行うにあたり、お世話になった方々にこの場を借りてお礼を申し上げます。

高崎史彦氏と三國和美氏にはインターンシップからの旅費支給について大変お世話になりました。また MLF D2 ラインで実験を行うにあたり、測定の大いな邪魔になるにもかかわらず受け入れていただいた  $g - 2$  BPM グループの方々に感謝いたします。事前準備やビームラインでのセットアップについて、三宅康博氏、三部勉氏に多大なご助力をいただきました。また現場では大谷将士氏、山崎高幸氏に大きなサポートをいただき、滞りなく準備と撤収をすることができました。測定内容について、京都大学化学研究所の岩下芳久氏に多くのアドバイスをいただきました。

## 参考文献

- [1] <http://www2.kek.jp/uskek/acc-internship/index.html>
- [2] [http://is.j-parc.jp/u0/page\\_jpn/exp-undergraduate\\_student.html](http://is.j-parc.jp/u0/page_jpn/exp-undergraduate_student.html)
- [3] [https://j-parc.jp/researcher/MatLife/ja/instrumentation/ms\\_source.html](https://j-parc.jp/researcher/MatLife/ja/instrumentation/ms_source.html)
- [4] <http://mlfuser.cross-tokai.jp/ja/d2.html>