

(反)ミューオン質量の測定実験 の準備

発表日: 2025/03/17

2024年度P2

三日月柊斗

背景(基礎知識)

反ミューオンの基本情報

質量	105.658 366 68(38) MeV/c ²
電荷	+1
スピン	1/2
平均寿命	2.197 934(21) × 10 ⁻⁶ s
アイソスピン	0
レプトン数	1

背景と研究目的

過去のP1/P2の課題研究ではミューオンの寿命やg因子の測定などは行っていたが、質量の測定は行っていなかった。

→ 質量測定は(学内に限るとはいえ)新規性がある！

+ 加速器を用いた物理実験の手法を学ぶため

→ 加速器を用いて、ミューオンの質量を可能な限りの高精度で測定する

研究方法

ミューオンの運動エネルギー

$$E = mc^2(\gamma - 1)$$

または、運動量

$$p = m\gamma v$$

の関係式を用いて質量の計算を行う。

運動エネルギーおよび運動量 → シミュレーションで予測

速度 → 加速器を用いてTOF測定

研究方法(質量の見積もりと誤差)

運動エネルギーの式を用いた場合:

$$m = \frac{E}{c^2(\gamma - 1)}$$

相対誤差:

$$\left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 = \left(\frac{\Delta E}{E}\right)^2 + \left(\frac{c(\gamma - 1)^{1/2}(\gamma + 1)^{3/2}}{d}\right)^2 (\Delta t_1^2 + \Delta t_2^2)$$

d :測定間隔 c :光速 γ :ローレンツ因子 E :運動エネルギー

研究方法(質量の見積もりと誤差)

運動量の式を用いた場合:

$$m = \frac{p}{\gamma v}$$

相対誤差:

$$\left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 = \left(\frac{\Delta p}{p}\right)^2 + \left(\frac{c\gamma(\gamma - 1)^{1/2}(\gamma + 1)^{1/2}}{d}\right)^2 (\Delta t_1^2 + \Delta t_2^2)$$

d :測定間隔 v :粒子の速さ c :光速 γ :ローレンツ因子 p :運動量

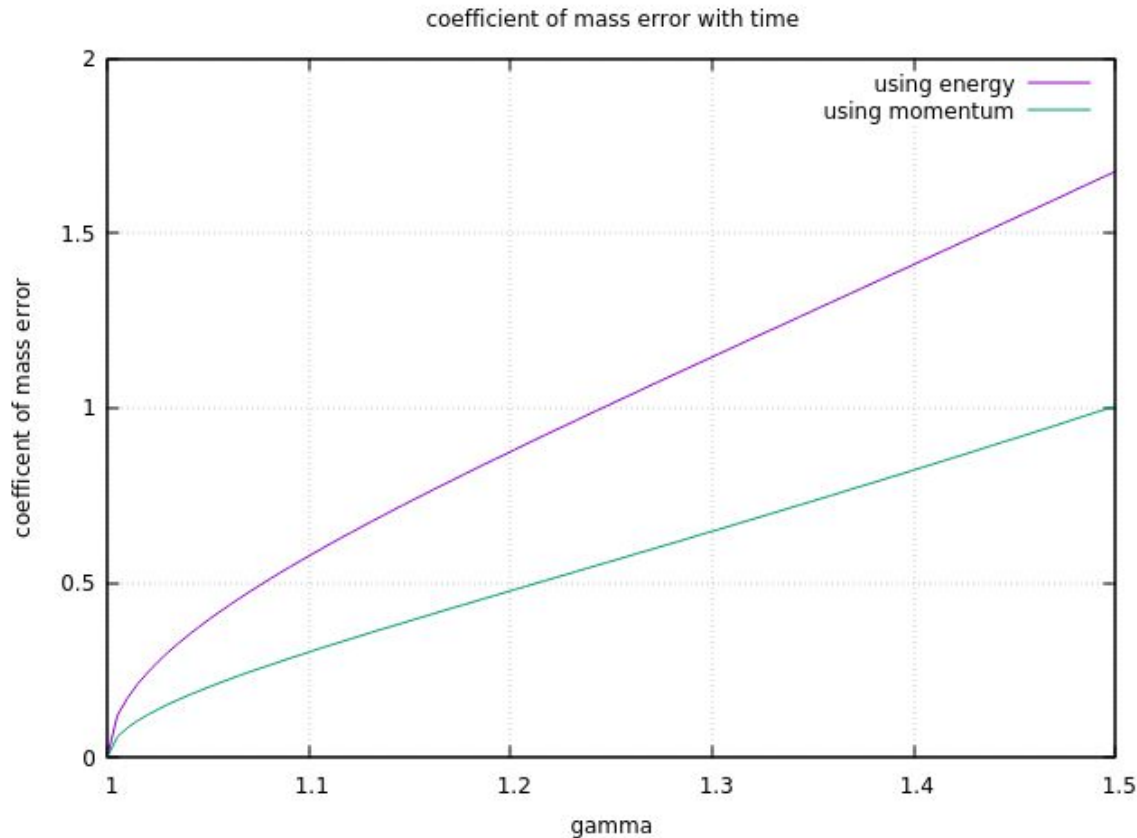
研究方法(それぞれの方法の比較)

前述の誤差の、時間に依存する部分のみグラフ化

(※ $d = 50 \text{ cm}$)

また、 $E < cp$ が常に成立している。

→ 誤差を抑えるうえでは、運動量の関係式を用いたほうが良い。



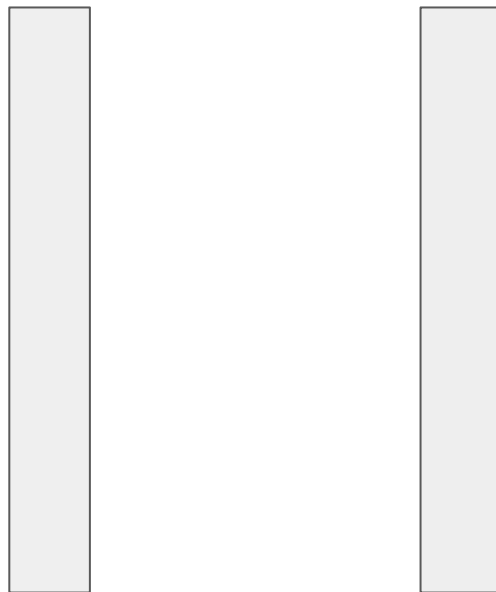
実験方法

プラスチックシンチレータ

断面積 24cm×20cm

幅 7mm

ビームに対して垂直に設置

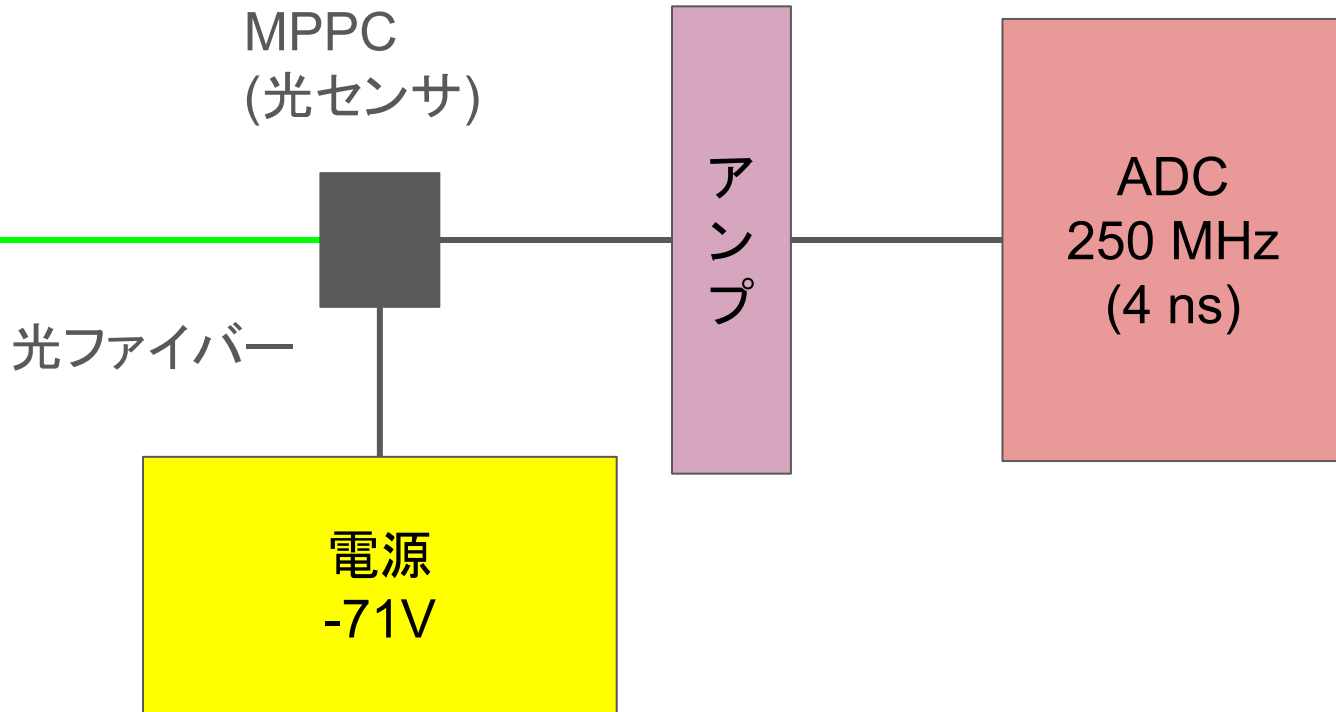


線源 : J-Parc MLF
Muon D2 ビームラインを使用(予定)

線源からの距離を変えながらTOFを測定

セットアップ(回路)

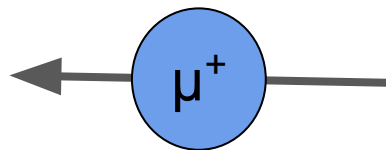
プラスチック
シンチレータ
面積 24cm×20cm
厚さ 7mm



セットアップ(シミュレーション)

基本的な設計は前述の実験方法と同じ。

ただし、エネルギー測定のため、シンチレータの厚さは十分厚くした。



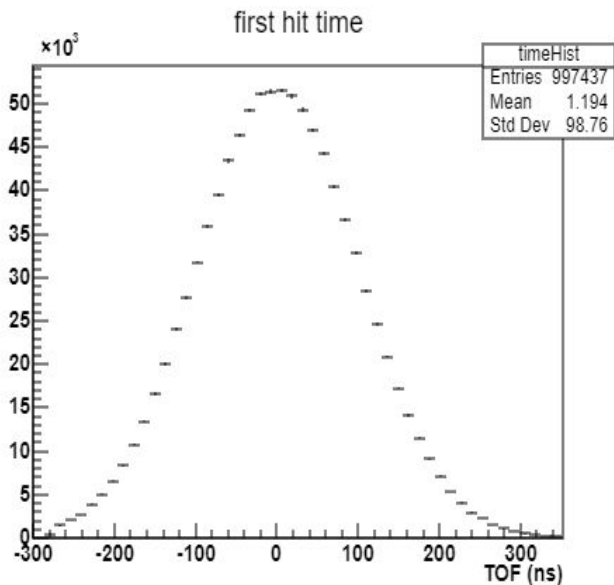
ミュープラスビーム

空間的広がり: 0
時間的広がり: 100 ns
エネルギー広がり: 5%
(運動量広がり: 5%)

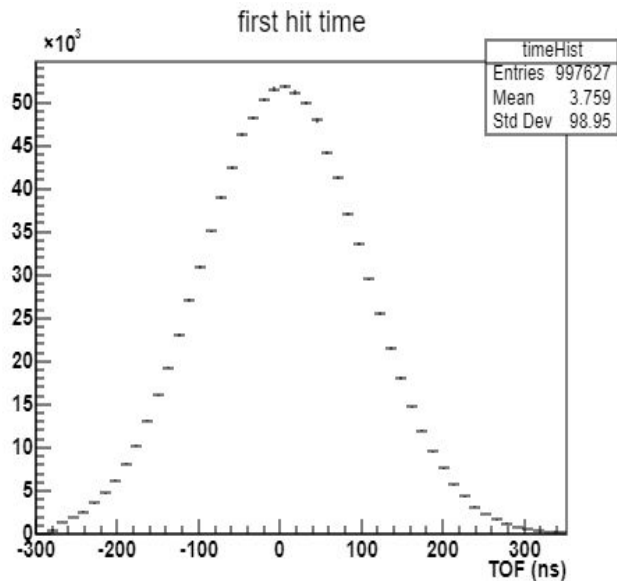
MLFの性能を参照

シミュレーションの結果(粒子質量固定)

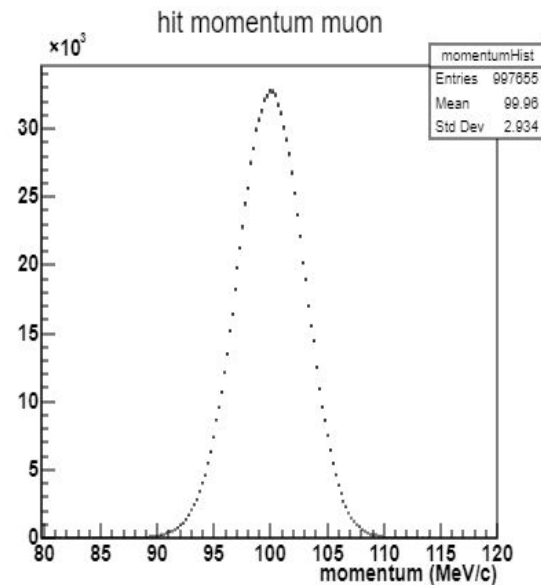
初期エネルギー: $40\text{MeV}/c^2$ 粒子数: 10^6



線源からの距離: 10 cm



線源からの距離: 60 cm



線源からの距離: 35 cm

シミュレーションの結果(粒子質量固定)

初期エネルギー: $40\text{MeV}/c^2$ 粒子数: 10^6

	10cm	60cm		35cm
time	0.822541 ns	3.39863 ns	momentum	99.9663 MeV/c
time error	0.100689 ns	0.100821 ns	momentum error	0.00293663 MeV/c

Lorentz factor	1.31211
mass error coefficient with time	0.668314 /ns
mass error coefficient with momentum	0.0100034 /(MeV/c)

シミュレーションの結果(粒子質量非固定)

初期運動量: 30 MeV/c 線源からの距離: 60 cm 粒子数: 10^4

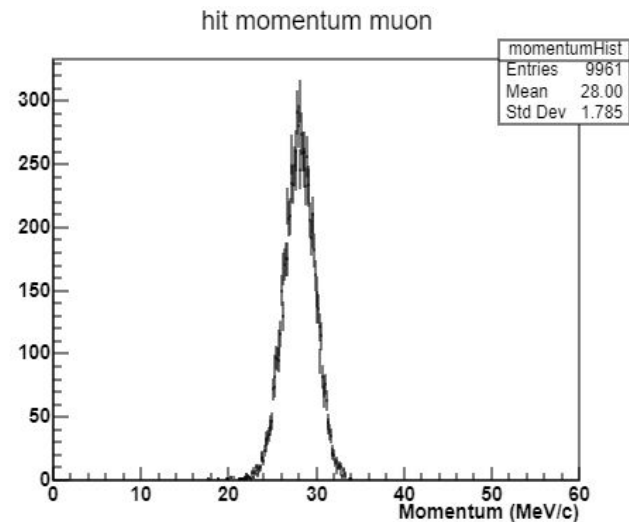
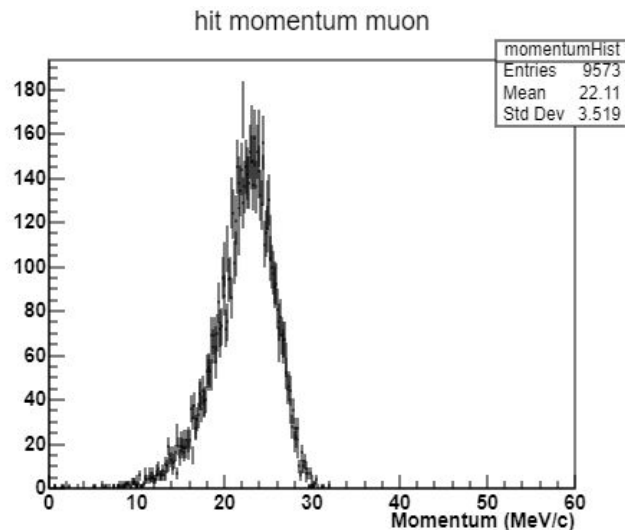
NO HIT

mass double
No Data

mass same
22.1 MeV/c

mass half
28.0 MeV/c

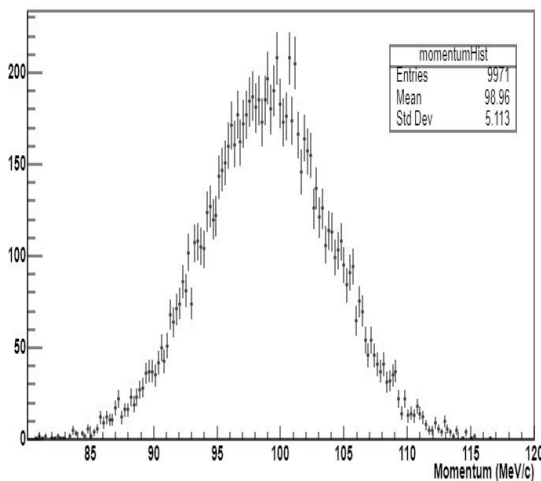
→ 誤差は 6 MeV/c 程度



シミュレーションの結果(粒子質量非固定)

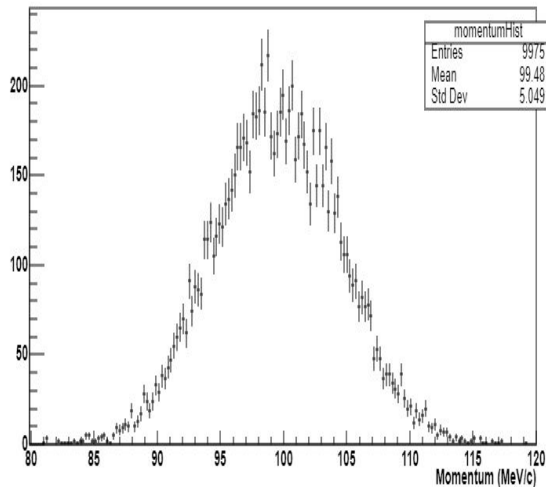
初期運動量: 100 MeV/c 線源からの距離: 60cm 粒子数: 10^4

hit momentum muon



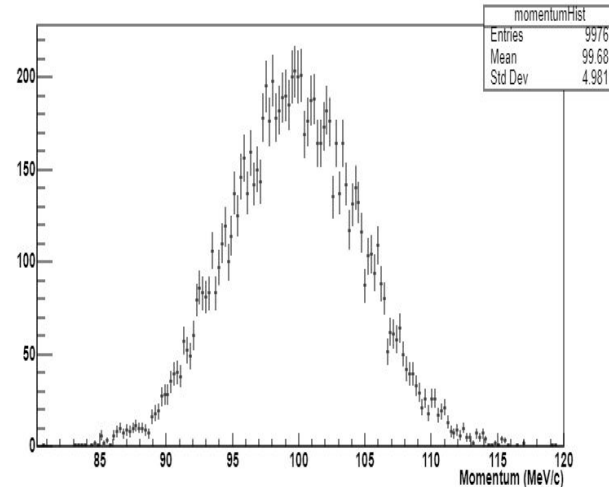
mass double
99.0 MeV/c

hit momentum muon



mass same
99.5 MeV/c

hit momentum muon



mass half
99.7 MeV/c

→ 誤差はたかだか ~1 MeV/c

シミュレーションの考察(初期運動量に関して)

ミュオン質量を未知とする

→シミュレーションで予測した運動量の系統誤差: 高運動量で小
(※統計数によって抑え込むことが不可能)

時間に関する誤差: 低運動量(Lorentz因子小)で誤差(係数)小

MLFで利用可能な $<100 \text{ MeV}/c$ の範囲で、時間による誤差係数 < 0.83

→統計数によって十分抑え込めるため、高運動量のミュオンで測定したほうが良い。また、高運動量では測定間隔 d を大きくすることも可能。

シミュレーションの考察(現時点の誤差の評価)

初期運動量: 100 MeV/c 粒子数: 10^7 測定間隔: 50 cm

運動量に依存する誤差 $\sim (1 \text{ MeV/c}) / (100 \text{ MeV/c}) = 0.01$

時間に依存する誤差 $\sim (0.032 \text{ ns}) * (0.7 \text{ /ns}) \sim 0.02$

質量の相対誤差 $\sim (0.01^2 + 0.02^2)^{1/2} \sim 0.022 = 2.2 \%$

→ 現時点でも、2.2 % 程度の誤差で測定可能なはず。

シミュレーションの考察(より誤差を抑える)

初期運動量: 100 MeV/c 粒子数: 10^7 測定間隔: 140 cm

Lorentz因子 < 1.4 より、時間に依存する誤差の係数 < 0.3 /ns

→ 時間に依存する誤差 < 0.0095

質量の誤差 3% で運動量をシミュレーション

→ 系統誤差 < 0.06 MeV/c 統計誤差 < 0.002 MeV/c

→ 運動量に依存する誤差 < 0.0008

→ 相対誤差 < 0.0096

→ 理論上は、粒子数 10^7 で誤差を 1% 未満まで抑えることが可能!

予備実験のセットアップ

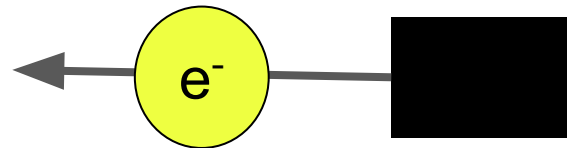
線形加速器による電子ビームを用いて、測定器の時間分解能の評価を行った。



シンチレータ二個で時間を測定し、TOFを求める



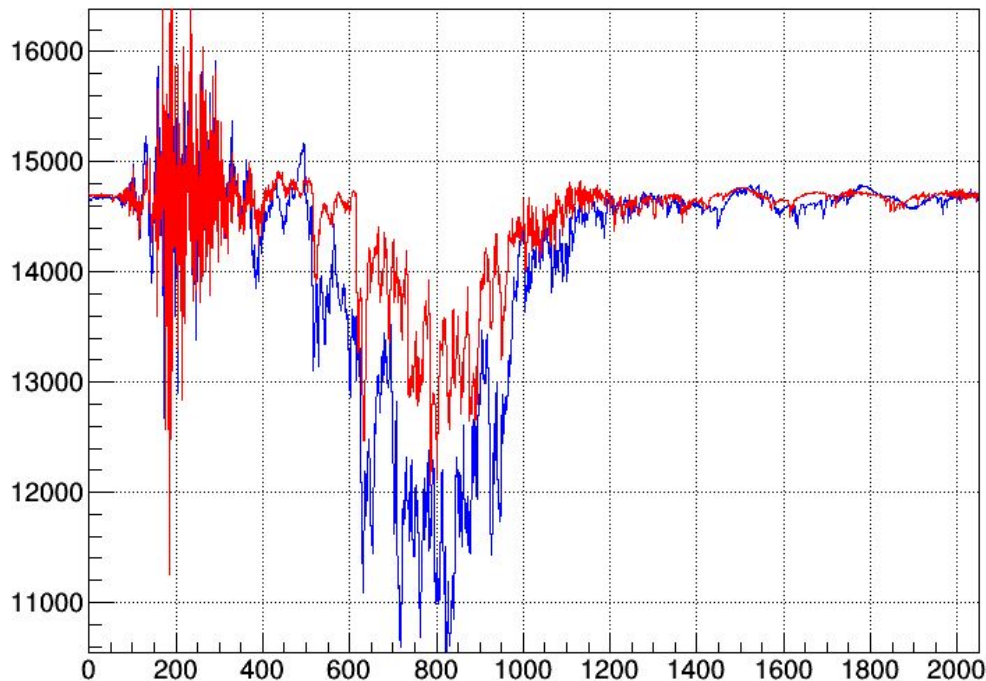
電子ビーム
時間幅: $1.2 \mu\text{s}$
20 Hz
10 min 測定



線源

予備実験の結果(波形)

Graph



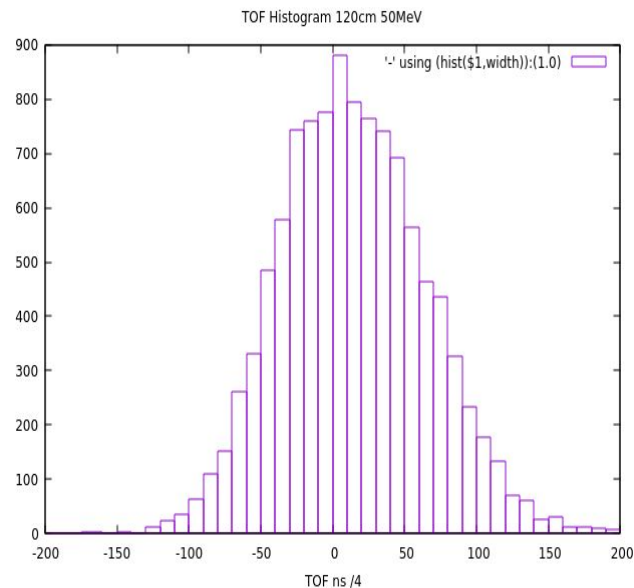
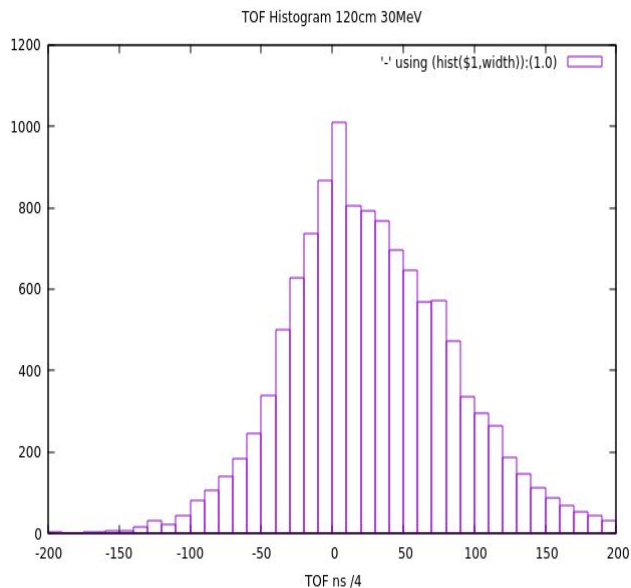
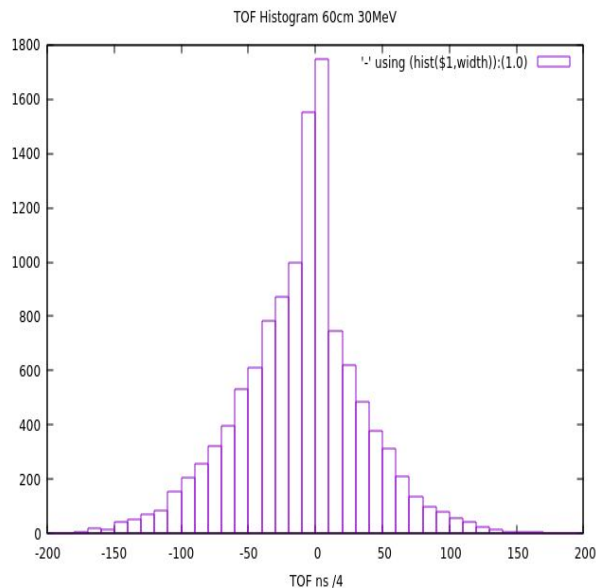
初期運動エネルギー: 30 MeV

測定間隔: 120 cm

青いグラフが線源側

横軸は1メモリ4 ns

予備実験の結果(TOFのヒストグラム)



閾値14000で、波形の立下り時刻の差をとった。

予備実験の結果(データ)

	60 cm 30 MeV	80 cm 30 MeV	100 cm 30 MeV	120 cm 30 MeV	120 cm 50 MeV
time	-46.4 ns	-1.25 ns	48.6 ns	104 ns	54.0 ns
time error	1.77 ns	1.68 ns	2.47 ns	2.71 ns	2.41 ns
ゆらぎによる誤差	1.67 ± 0.0329 ns	1.54 ± 0.0186 ns	0.582 ± 0.0169 ns	2.57 ± 0.0165 ns	2.28 ± 0.0144 ns
測定機による誤差	0.0884 ± 0.0329 ns	0.143 ± 0.0186 ns	0.139 ± 0.0169 ns	0.136 ± 0.0165 ns	0.14 ± 0.0144 ns

予備実験の考察(検出器の時間分解能評価)

測定精度にのみ注目:

$N = 10^4$ のとき、幅 100 ns のビームの理想的な誤差は ~ 1 ns

予備実験では測定器依存の誤差が 0.17 ns 未満

→ 大きな影響は与えないが、考慮する必要あり

予備実験の考察(検出器の確度)

測定確度に注目:

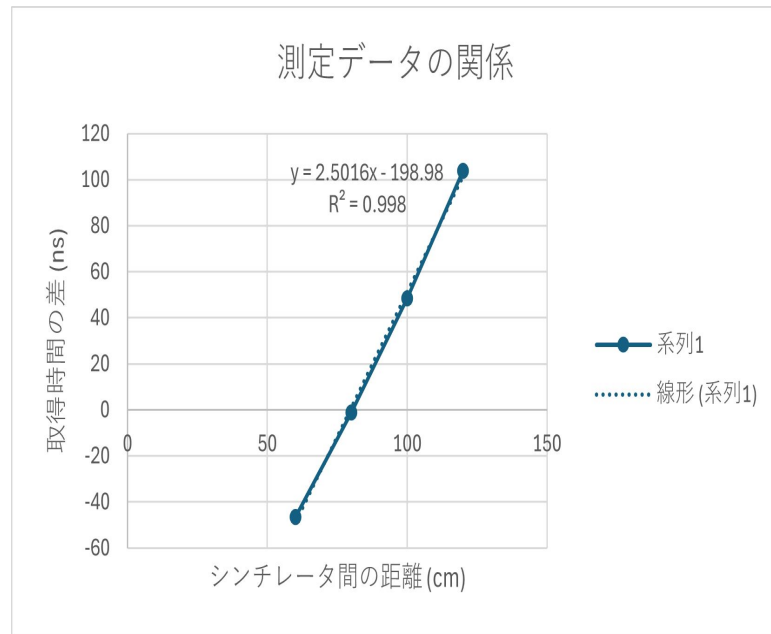
エネルギー 30 MeV 以上の電子はほぼ光速

→ 結果の確度が悪い

グラフ化するとほぼ線形で、傾きが
 2.5×10^7 m/sこれも遅い

→ 何らかの原因で遅延が発生?

解析手法の問題?



今後の予定

- ・来年度の5月ごろにMLFが復旧すれば、本実験を行う。
- ・測定器の確度が悪かった原因を考察し、本実験までに改善案を考えておく。
- ・予備実験の実験結果を踏まえて、質量測定の誤差をより小さくする方法を考える。
- ・現段階ではビームラインのカバーを考慮していないので、それも含めたシミュレーションを行う。

謝辞

本研究を行うにあたり、指導教官の中家教授や木河助教、TAの恩田さんや溝添さんに多くの助言や協力をいただき、大変お世話になりました。

加えて、加速器を実験に使用することを認めてアドバイスもくださったJ-PARC MLF Muon D2ビームラインの関係者の方々、並びに予備実験のために電子線形加速器を使わせて下さった京都大学化学研究所附属先端ビームナノ科学センターのみなさまに、この場を借りてお礼申し上げます。

参考文献

1. J-PARC MLF. “Muon D2 | J-PARC MLF”. Meet @ MLF: MLF User Information. 2019. <https://mlfinfo.jp/ja/d2/>, (参照 2025-03-17).
2. Particle Data Group. PARTICLE PHYSICS BOOKLET. Particle Data Group, 2022.
3. 中野 董夫. 相対性理論. 岩波書店, 2021, 物理入門コース.
4. 浜松ホトニクス. “MPPC[®]とは | MPPC (SiPM)・SPAD”. 浜松ホトニクス. 2025.
https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/mppc/what_is_mppc.html, (参照 2025-03-17).
5. 京都大学化学研究所. “電子線形加速器”. 京都大学化学研究所附属先端ビームナノ科学センター粒子ビーム科学研究領域. 2025.
<https://pbs.kuicr.kyoto-u.ac.jp/research-equipments-ja/electron-linac-ja/>, (参照 2025-03-17).