修士論文

MEG II 実験におけるマルチピクセル陽電子タイミングカウンターの位置較正に関する研究

Research on Position Calibration of Multi-pixelated Positron Timing Counter in MEG II Experiment

東京大学大学院 理学系研究科 物理学専攻素粒子物理国際研究センター 森研究室

35-196101

米本 拓

2020年1月

概要

標準模型を超える物理の一つである $\mu^+ \to e^+ \gamma$ 崩壊を世界最高感度で探索した MEG 実験では、崩壊分岐比に上限値 $\mathcal{B}(\mu^+ \to e^+ \gamma) < 4.2 \times 10^{-13} (90\% \text{ C.L.})$ を与えたが発見には至らなかった。実験における大きな問題点として、最大強度の μ^+ ビームに伴う多数の偶発的背景事象を分離することが出来ず、 μ^+ ビームを低減し事象数を絞っていたことがあった。後継の MEG II 実験では、最大強度の μ^+ ビームとそれに耐えうる高性能で新しいデザインの検出器を用いることで、 $\mathcal{O}(10^{-14})$ の分岐比感度を目指している。

偶発的背景事象を分離するためには、粒子の時間を高精度で測定する必要がある。MEG II 実験におけるマルチピクセル陽電子タイミングカウンター (pixelated Timing Counter, pTC) は、ミューオン μ^+ の崩壊に伴って放出される陽電子 e^+ の時間を測定する検出器である。プラスチックシンチレータと読み出しのシリコン光検出器 (SiPM) からなる小型シンチレーションカウンターを「ピクセル」と呼称し、512 個のピクセルによって e^+ の時間を精度良く測定する。1 個の e^+ が複数のピクセルを通過するように配置されており、複数回の測定により 30ps 台の高い時間分解能を実現している。本論文では、各ピクセルについての位置較正手法の開発、及びピクセルの位置のずれが時間分解能に与える影響の評価について述べる。

↓ ↓ ↓ ↓ ↓ 成果

目次

第1章	序論	3
第2章	$\mu^+ o e^+ \gamma$ 崩壊	4
2.1	ミューオンについて	4
	2.1.1 基本性質	4
	2.1.2 崩壊モード	4
2.2	標準模型	5
	2.2.1 レプトンフレーバー保存	5
	2.2.2 中性レプトンフレーバー保存の破れ	6
2.3	標準理論を超える物理	6
2.4	実験における信号・背景事象	7
2.5	展望	7
第3章	MEG II 実験	9
3.1	概要	9
3.2	陽電子タイミングカウンター (pTC)	9
3.3	ドリフトチェンバー (CDCH)	9
3.4	液体キセノンガンマ線検出器 (LXe)	9
3.5	輻射崩壊検出器 (RDC)	9
3.6	DAQ	9
3.7	展望	9
第4章	陽電子タイミングカウンター	10
4.1	MEG II 実験での pTC への要請	10
	4.1.1 MEG 実験における TC	10
	4.1.2 MEG II 実験におけるアップグレード	11
4.2	マルチピクセル化された陽電子タイミングカウンター	12
	4.2.1 複数ヒットの仕組み	12
	4.2.2 時間分解能	12
	4.2.3 位置較正	12
4.3	ピクセル (小型カウンター)	12
	4.3.1 SiPM	12
	4.3.2 プラスチックシンチレータ	12

4.4	読み出し	12
4.5	解析	12
4.6	時間較正	12
	4.6.1 レーザー較正	12
	4.6.2 ミシェル較正	12
第5章	陽電子タイミングカウンターの位置較正	13
5.1	背景	13
5.2	3D スキャンによる位置較正	14
	5.2.1 3D スキャンにおける測量	14
	5.2.2 スキャンデータの解析	14
	5.2.3 実験エリアにおける測量	14
	5.2.4 測量基準点 (reference point)	15
	5.2.5 結果	15
	5.2.6 考察	15
5.3	軌跡再構成による位置較正の試み	15
	5.3.1 原理	15
	5.3.2 課題	15
	5.3.3 考察	15
5.4	各ピクセルの位置のずれが与える影響の評価	15
第6章	Physics Run に向けて	16
6.1	・ 位置較正システムの運用	16
6.2	課題	16
	6.2.1 ドリフトチェンバーとの複合解析に向けて	16
生 2 辛	北京したしみ	17
第7章	考察とまとめ	17
第Ⅰ部	付録	19
付録 A	3D 測量機器について	20
付録 B	軌跡再構成について	21
B.1	カルマンフィルター	21
B.2	クラスタリング・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	21
B.3	ドリフトチェンバーとのマッチング	21
参考文献		22

第1章

序論

素粒子物理学とは、物質を構成する最小単位「素粒子」から物理法則を統一的に理解しようとする試みである。現代素粒子物理学においては、実験的事実と良く整合する「標準模型 (Standard Model, SM)」が理論的な枠組みとなる。2012 年に LHC でヒッグス粒子が発見されたことで標準模型の主張は盤石なものとなったが、一方でニュートリノ振動やミューオン異常時期能率からのずれなど、標準模型では説明出来ない現象はまだまだ残されている。これらの実験的事実が示唆する、より統一的な理論へと至るため、「標準模型を超える物理 (Beyond Standard Model, BSM)」の研究が盛んに行われている。

標準模型においてレプトンの世代間混合は許されず、このことをレプトンフレーバー保存と呼ぶ。しかし、既に発見されているニュートリノ振動は中性レプトンフレーバー保存の破れを示す現象であり、多くの BSM においてレプトンフレーバーは保存されず、荷電レプトンフレーバー保存の破れ (charged Lepton Flavor Violation, cLFV) についてもその存在と観測可能性が予言されている。

cLFV の一種である $\mu^+ \to e^+ \gamma$ 崩壊について、理論と実験の両面から多くの研究がなされてきた。 $\mu^+ \to e^+ \gamma$ 崩壊の探索を目的とする MEG II 実験 [1] は、世界最高強度のミューオン源を有するスイスのポールシェラー研究所 (Paul Scherrer Institute, PSI) で間もなく稼働予定である。現行の $\mu^+ \to e^+ \gamma$ 崩壊の分岐 比上限 4.2×10^{-13} を与えた前身の MEG 実験 [2] を超え、 $\mathcal{O}(10^{-14})$ の分岐比感度を実現するため、MEG II 実験では PSI で使用可能な最大強度のミューオンビームとそれに耐えうる高性能な検出器を運用していく。

MEG II 実験における陽電子タイミングカウンター (pixelated Positron Timing Counter, pTC) は、複数ヒット測定により 30ps 台の高い精度で陽電子の時間を測定する検出器である。「ピクセル」と呼ばれる $120\text{mm} \times 40(50)\text{mm} \times 5\text{mm}$ の小型シンチレーションカウンターが、半円筒面状のサポートの上に 512 個配置されたマルチピクセル構造をしている。

本論文の構成は、物理的背景 (2章)、MEGII 実験について (3章)、陽電子タイミングカウンターについて (4章)、位置較正について (5章) となっており、展望を交えつつ 6,7章でまとめる。

第2章

$\mu^+ \to e^+ \gamma$ 崩壊

本章では、荷電レプトンフレーバー保存の破れ (charged Lepton Flavor Violation, cLFV) の 1 つである $\mu^+ \to e^+ \gamma$ 崩壊探索のモチベーションや現状について述べる。標準模型で禁止されているこの崩壊過程は、超 対称性模型を中心とした新物理において実験的に観測可能であると予言されている。

2.1 ミューオンについて

2.1.1 基本性質

ミューオンの基本性質を表 2.1 にまとめる。質量が大きくなく、生成が容易であることが利点である。

表 2.1: ミューオンの基本性質 [5]

質量	$105.6583745 \pm 0.0000024~\mathrm{MeV}$
寿命	$(2.1969811 \pm 0.0000022) \times 10^{-6} \text{ s}$
異常磁気能率	$(116591810 \pm 43) \times 10^{-11}$ [6]
電気双極子能率	$< 1.8 \times 10^{-19} e \text{ cm } (95\% \text{ C.L.})$

異常磁気能率についてのみ、フェルミ研究所による測定の最新結果を記載した。今後さらなる議論や、 J-PARC における再検証が予定されている [7]。

2.1.2 崩壊モード

各崩壊モードへの分岐比の測定値を表 2.1.2 に示す。ただし、ミシェル崩壊と輻射崩壊は明確に区分して測定することが出来ないため、輻射崩壊については $E_e>45$ MeV、 $E_\gamma>40$ MeV のものを示している。また、cLFV 過程については分岐比の上限値を 90% 信頼区間で示している。

ミューオン崩壊のほぼ 100% を占めるミシェル崩壊 $(\mu^+ \to e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu)$ により生成される陽電子は、陽電子タイミングカウンターの運用に大きく関わっている $(4 \, \bar{\varphi})_o$

表 2.2: ミューオンの崩壊モードと分岐比 [5]。

崩壊モード	分岐比 (測定値)
$\mu^+ \to e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu \ (ミシェル崩壊)$	~ 1
$\mu^+ \to e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu \gamma$ (輻射崩壊)	$(6.0 \pm 0.5) \times 10^{-8}$
$\mu^+ \to e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu e^+ e^-$	$(3.4 \pm 0.4) \times 10^{-5}$
$\mu^+ \to e^+ \gamma$	$< 4.2 \times 10^{-13} (90\% \text{ C.L.})$
$\mu^+ \to e^+ e^- e^+$	$< 1.0 \times 10^{-12} (90\% \text{ C.L.})$
$\mu^+ \to e^+ 2\gamma$	$< 7.2 \times 10^{-11} \ (90\% \ \text{C.L.})$
$\mu^+ \to e^+ \bar{\nu}_e \nu_\mu$	$< 1.2 \times 10^{-2} $ (90% C.L.)

2.2 標準模型

2.2.1 レプトンフレーバー保存

標準模型 (Standard Model, SM) は、100GeV 程度までのエネルギー領域における多くの実験的事実と整合する、現代素粒子物理学の理論的な枠組みとなるようなモデルである。図 2.1 に示す標準模型における 18 の素粒子は、2012 年にヒッグス粒子が発見されたことでその全てが発見されている。図の左側に示される 12 の粒子は、フェルミオンと呼ばれる物質を構成する素粒子である。その中で、強い相互作用に関する粒子はクォーク、そうでない粒子はレプトンと呼ばれる。標準模型において、クォークの世代間混合は許されており、その存在が実験的にも確認されている一方、レプトンの世代間混合は許されていない。これをレプトンフレーバー保存と呼ぶ。

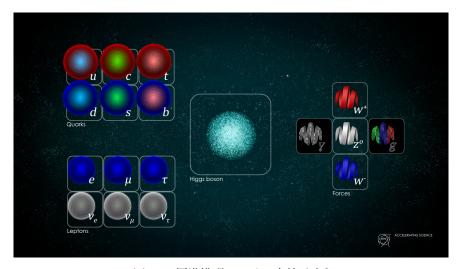


図 2.1: 標準模型における素粒子 [3]

2.2.2 中性レプトンフレーバー保存の破れ

近年、ニュートリノ振動が発見され [4]、中性レプトンにおいてはフレーバー保存が破られることが分かった。これによる標準模型の素朴な拡張として、ニュートリノ振動 $\bar{\nu}_{\mu} \to \bar{\nu}_{e}$ を介した cLFV 過程 $\mu^{+} \to e^{+}\gamma$ について、図 2.2 のようなファインマンダイアグラムを考えることが出来る。しかしこの過程は、ニュートリノの質量が非常に小さいことから強力な制限を受け、分岐比は

$$\mathcal{B}(\mu^+ \to e^+ \gamma) = \frac{3\alpha}{32\pi} \left| \sum_{i=2,3} U_{\mu i}^* U_{ei} \frac{\Delta m_{i1}^2}{M_W} \right|^2 < 10^{-50}$$
 (2.1)

となる [8]。ここで、 α は微細構造定数、 U_{ij} はニュートリノ混合行列 (PMNS 行列) のフレーバー i、質量固有状態 j に対応する要素、 Δm_{ij}^2 はニュートリノの質量固有状態 i、j の質量差、 M_W は W ボソンの質量を表す。この非常に小さな分岐比は、標準模型にニュートリノの質量を組み込んだ素朴な拡張において、 $\mu^+ \to e^+ \gamma$ 崩壊は現実的に観測不可能であることを意味する。

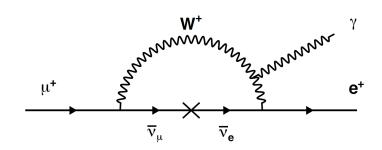


図 2.2: ニュートリノ振動を介した $\mu^+ \to e^+ \gamma$ 崩壊のファインマンダイアグラム

2.3 標準理論を超える物理

新物理のスケールを Λ とすると、有効ラグランジアンは、

$$\mathcal{L}_{eff} = \mathcal{L}_{SM} + \sum_{n \ge 5} \sum_{m} \frac{1}{\Lambda^{n-4}} C_m^{(n)} \mathcal{O}_m^{(n)}$$
 (2.2)

の形で書ける [?]。ここで、 \mathcal{L}_{SM} は標準模型におけるラグランジアン、n は次元、 $C_m^{(n)}$ は無次元の係数、 $\mathcal{O}_m^{(n)}$ は繰り込み不可能な n 次元のオペレータを表す。n=5 では cLFV に対しループレベルでの寄与しか得られず、 $n\geq 7$ ではさらに $\frac{1}{\Lambda}$ がかかるのでここでは考えない。n=6 で $\mu^+\to e^+\gamma$ に寄与する双極子型のオペレータのみを考え、これから得られる崩壊率を計算すると、

$$\Gamma(\mu^+ \to e^+ \gamma) = \frac{m_\mu^3 v^2}{8\pi \Lambda^4} (|C_{e\gamma}^{e\mu}|^2 + |C_{e\gamma}^{\mu e}|^2)$$
 (2.3)

ここで、 m_μ はミューオンの質量、v はヒッグス場の真空期待値を表す。この式から、ニュートリノ振動のみを考慮した標準模型における分岐比より、小さなエネルギースケールまたは大きな係数を伴って $\mu^+ \to e^+ \gamma$ 崩壊が起こることが示される。

2.4 実験における信号・背景事象

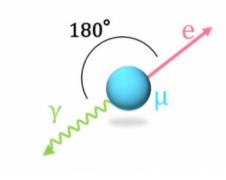


図 2.3: $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 崩壊

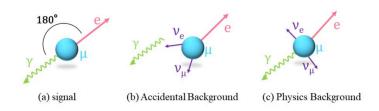


図 2.4: 主要な背景事象

2.5 展望

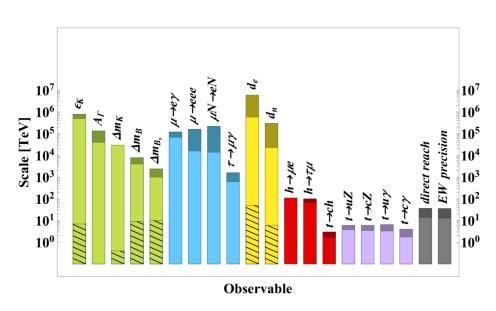


図 2.5: 様々な新物理探索のエネルギースケール [9]。斜線部は、有効ラグランジアンにおける 6 次元演算子の係数について MFV (Minimal Flavor Violation) factor による制限を受けたものを表す。明るい色は既存のデータにによるもの、暗い色は HL-LHC、Belle II、MEG II、Mu3e、Mu2e、COMET、ACME、PIK、SNS などの中期的計画にそれぞれ対応する。

第3章

MEG II 実験

3.1 概要

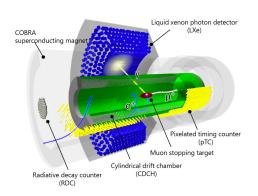


図 3.1: MEG II 実験における検出器の概観

- 3.2 **陽電子タイミングカウンター** (pTC)
- 3.3 **ドリフトチェンバー** (CDCH)
- 3.4 液体キセノンガンマ線検出器 (LXe)
- 3.5 **輻射崩壊検出器** (RDC)
- 3.6 DAQ
- 3.7 展望

第4章

陽電子タイミングカウンター

本章では、本研究の対象である陽電子タイミングカウンター (pTC) の原理及びその構成についてまとめる。

4.1 MEG II 実験での pTC への要請

MEG II 実験において、pTC は陽電子の時間を測定することで、ミューオンの崩壊時刻を精度良く求める役割を担う。

信号事象である $\mu^+ \to e^+ \gamma$ 崩壊が起こった場合、崩壊時刻の分解能 $\sigma_{t_{vertex}}$ は以下の式で与えられる。

$$\sigma_{t_{vertex}} = \sqrt{\sigma_{t_{e^+}}^2 + \sigma_{t_{\gamma}}^2}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{\sigma_{l_{e^+}}^{\text{CDCH}}}{c}\right)^2 + (\sigma_{t_{e^+}}^{\text{PTC}})^2 + \sigma_{t_{\gamma}}^2}$$
(4.1)

ここで、 $\sigma_{t_{e^+}}$ は陽電子測定の時間分解能、 $\sigma_{t_{\gamma}}$ はガンマ線測定の時間分解能、 $\sigma_{l_{e^+}}^{\text{CDCH}}$ はドリフトチェンバー (CDCH) による陽電子軌跡の不確かさ、c は光速、 $\sigma_{t_{e^+}}^{\text{PTC}}$ は pTC による陽電子測定の時間分解能を表す。モンテカルロシミュレーションにより、液体キセノンガンマ線検出器 (LXe) によるガンマ線測定の時間分解能は 50-70ps、CDCH による陽電子軌跡の不確かさは $\sigma_{l_{e^+}}^{CDCH}/c\sim70$ ps と見積もられているため、 $\sigma_{t_{vertex}}\leq 84$ ps を達成する (3.7) ためには、pTC は $\sigma_{t_{e^+}}^{\text{PTC}}\sim46$ ps を満たす必要がある。

4.1.1 MEG 実験における TC

MEG 実験における陽電子タイミングカウンター (TC) は、30 本の大型シンチレーターバーと読み出しの光電子増倍管 (PMT) からなるものであった。問題点としては、シンチレーターバーが大きいことで読み出し以前の不定性が生まれること、また同様の理由からパイルアップイベントに弱いことがあった。加えて、シンチレーターバー間での時間較正の精度も悪く、COBRA 磁場下での PMT の劣化なども相まって、最終的な運用における陽電子の時間分解能は 70ps 程度であった。

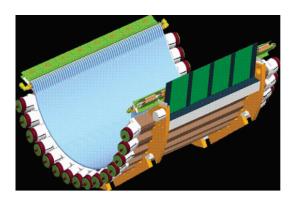


図 4.1: MEG 実験における陽電子タイミングカウンター (TC)

4.1.2 MEG II 実験におけるアップグレード

MEG II 実験では、pTC は小型シンチレーションカウンター「ピクセル」を合計 512 個を用いることで、高い時間分解能を得る。MEG 実験における TC からの主な改善点として、

- 高性能な光検出器であるシリコン光検出器 (SIPM) により、各ピクセルが小型かつ高い時間分解能を 持つ。
- 複数ヒット検出により、全体としての時間分解能はさらに高精度になる。
- 各ピクセルが小型であるため、パイルアップイベントが生じにくい。
- SiPM には磁場耐性がある。

- 4.2 マルチピクセル化された陽電子タイミングカウンター
- 4.2.1 複数ヒットの仕組み
- 4.2.2 時間分解能
- 4.2.3 位置較正
- 4.3 ピクセル (小型カウンター)
- 4.3.1 SiPM
- 4.3.2 プラスチックシンチレータ
- 4.4 読み出し
- 4.5 解析
- 4.6 時間較正
- 4.6.1 レーザー較正
- 4.6.2 ミシェル較正

第5章

陽電子タイミングカウンターの位置較正

本章では、本研究の主題である陽電子タイミングカウンター (pixelated Timing Counter, pTC) の位置較正について、開発した手法と時間分解能に与える影響の評価を述べる。

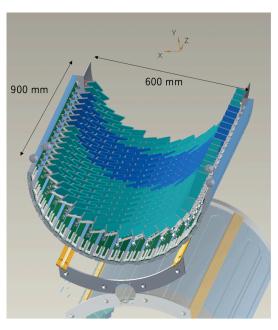


図 5.1: CAD における pTC(上流側) の概観

5.1 背景

MEG II 実験において、pTC はドリフトチェンバー (CDCH) との陽電子の複合測定・解析により陽電子再構成を行う検出器である。図 5.1 に示されるような構造体が、ビーム上流側と下流側にターゲットを挟んで対となるように設置されるが、実験エリアにおける位置についてこれまでは検証されてこなかった。そのため、一つ目の課題として実験エリアにおけるグローバルな位置を測定し、CDCH との位置関係を明確にするということがあった。

加えて、複数ヒットによる時間測定を行うために、複数のピクセルの位置が系統的にずれていた場合、そ

れは積み重なって時間再構成に影響してくる。よって、二つ目の課題として 512 個全てのピクセルに対し、各々の時間分解能を考慮し、時間測定に影響を及ぼさないような精度でのローカルな位置の較正を行うことがあった。

5.2 3D スキャンによる位置較正

本研究の要となる、3Dスキャナーを用いた位置構成について述べる。

5.2.1 3D スキャンにおける測量

・光学的な原理など

5.2.2 スキャンデータの解析

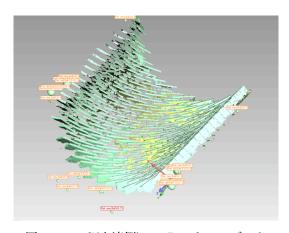


図 5.2: pTC(上流側) の 3D スキャンデータ

3D スキャンにおける座標系での測定結果を、CAD 上の設計値と比較するために、実験エリアにおける座標系に移す必要がある。

5.2.3 実験エリアにおける測量

ここで、一つ目の課題であった実験エリアにおけるグローバルな位置較正と、前節の 3D スキャンから得られた結果を CAD 上の設計値と比較するために必要な、実験エリアにおける測量について述べる。

- 5.2.4 測量基準点 (reference point)
- 5.2.5 結果
- 5.2.6 考察
- 5.3 軌跡再構成による位置較正の試み
- 5.3.1 原理
- 5.3.2 課題
- 5.3.3 考察
- 5.4 各ピクセルの位置のずれが与える影響の評価

第6章

Physics Run に向けて

- 6.1 位置較正システムの運用
- 6.2 課題
- 6.2.1 ドリフトチェンバーとの複合解析に向けて

第7章

考察とまとめ

謝辞

第一部

付録

付録 A

3D 測量機器について

付録 B

軌跡再構成について

- B.1 カルマンフィルター
- B.2 クラスタリング
- B.3 **ドリフトチェンバーとのマッチング**

参考文献

- A. M. Baldini et al., The design of the MEG II experiment. Eur. Phys. J., C 78 (5), 380 (2018).
 doi: 10.1140/epjc/s10052-018-5845-6.
- [2] A. M. Baldini et al., Search for the lepton flavour violating decay $\mu^+ \to e^+ \gamma$ with the full dataset of the MEG experiment. *Eur. Phys. J.*, C **76** (8), 434 (2016). doi: 10.1140/epjc/s10052-016-4271-x.
- [3] CERN website. https://home.cern/science/physics/standard-model, cited on 14th Dec. 2020.
- [4] Y. Fukuda et al., Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos, *Phys. Rev. Lett.*, 81, 1562-1567 (1998). doi: 10.1103/PhysRevLett.81.1562
- [5] P.A. Zyla et al., Review of Particle Physics. Prog. Theor. Exp. Phys., Volume 2020, Issue 8, August 2020, 083C01.
 - $doi: \ 10.1093/ptep/ptaa104.$
- [6] T. Aoyama et al., The anomalous magnetic moment of the muon in the Standard Model, Phys. Rept., 887, 1-166 (2020).
 - doi: 10.1016/j.physrep.2020.07.006
- [7] KEK website. https://g-2.kek.jp/portal/index.html
- [8] Y. Kuno, Rare lepton decays, Prog. Part. Nucl. Phys., 82, 1-20 (2015).doi: 10.1016/j.ppnp.2015.01.003
- [9] European Strategy for Particle Physics Preparatory Group, Physics Briefing Book (2019). arXiv:1910.11775.