

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として注目されている $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 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 $B(\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma) < 4.2 \times 10^{-13}$ (90% 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、分岐比感度 $\mathcal{O}(10^{-14})$ 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 つの 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高い時間分解能 ($< 40\text{ps}$) 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 | 4 |
| 第 2 章 | $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 崩壊 | 5 |
| 2.1 | 標準模型におけるミューオン | 5 |
| 2.2 | ミューオンに関する公称値 | 5 |
| 2.3 | 標準理論を超える物理において | 6 |
| 2.4 | 実験における信号・背景事象 | 6 |
| 第 3 章 | MEG II 実験 | 7 |
| 3.1 | 概要 | 7 |
| 3.2 | 陽電子タイミングカウンター (pTC) | 7 |
| 3.3 | ドリフトチェンバー (CDCH) | 7 |
| 3.4 | 液体キセノンガンマ線検出器 (LXe) | 7 |
| 3.5 | 輻射崩壊検出器 (RDC) | 7 |
| 3.6 | DAQ | 7 |
| 3.7 | 展望 | 7 |
| 第 4 章 | 陽電子タイミングカウンター | 8 |
| 4.1 | MEG II 実験での pTC への要請 | 8 |
| 4.1.1 | MEG 実験における TC | 8 |
| 4.1.2 | MEG II 実験におけるアップグレード | 9 |
| 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 | 10 |
| 4.2.1 | 複数ヒットの仕組み | 10 |
| 4.2.2 | 時間分解能 | 10 |
| 4.2.3 | 位置較正 | 10 |
| 4.3 | ピクセル (小型カウンター) | 10 |
| 4.3.1 | SiPM | 10 |
| 4.3.2 | プラスチックシンチレータ | 10 |
| 4.4 | 読み出し | 10 |
| 4.5 | 解析 | 10 |
| 4.6 | 時間較正 | 10 |
| 4.6.1 | レーザー較正 | 10 |
| 4.6.2 | ミシェル較正 | 10 |

| | | |
|--------------|-----------------------------------|-----------|
| 第 5 章 | 陽電子タイミングカウンターの位置較正 | 11 |
| 5.1 | 3D スキャンによる位置較正 | 12 |
| 5.1.1 | 3D スキャンにおける測量 | 12 |
| 5.1.2 | 実験エリアにおける測量 | 12 |
| 5.1.3 | 測量基準点 (reference point) | 12 |
| 5.1.4 | スキャンデータの解析 | 12 |
| 5.1.5 | 結果 | 12 |
| 5.1.6 | 考察 | 12 |
| 5.2 | 軌跡再構成による位置較正の試み | 12 |
| 5.2.1 | 原理 | 12 |
| 5.2.2 | 課題 | 12 |
| 5.2.3 | 考察 | 12 |
| 5.3 | 各ピクセルの位置のずれが与える影響の評価 | 12 |
| 第 6 章 | Physics Run に向けて | 13 |
| 6.1 | 位置較正システムの運用 | 13 |
| 6.2 | 課題 | 13 |
| 6.2.1 | ドリフトチェンバーとの複合解析に向けて | 13 |
| 第 7 章 | 考察とまとめ | 14 |
| 第 I 部 | 付録 | 16 |
| 付録 A | 3D 測量機器について | 17 |
| 付録 B | 軌跡再構成について | 18 |
| B.1 | カルマンフィルター | 18 |
| B.2 | クラスタリング | 18 |
| B.3 | ドリフトチェンバーとのマッチング | 18 |
| 参考文献 | | 19 |

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」から物理法則を記述する試みである。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)」が理論的な枠組みの基本となる。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は標準模型では説明出来ない。これらの実験的事実が示唆する「標準模型を超える物理 (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フレーバーは保存するとされているが、中性レプトンフレーバーの破れであるところのニュートリノ振動は既に発見されている。そして、多くの BSM は荷電レプトンフレーバーの破れ (cLFV) の存在を予言し、cLFV の実験的探索が現在活発に進められている。cLFV の一種である $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 崩壊についても、理論と実験の両面から多くの研究がなされてきた。

$\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 崩壊の探索を目的とする MEG II 実験は、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 (PSI) で間もなく稼働予定である。現行の $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 崩壊の分岐比上限 4.2×10^{-13} を与えた前身の MEG 実験 [1] を超え、 $\mathcal{O}(10^{-14})$ の分岐比感度を実現するため、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 Timing Counter, pTC) は、複数ヒット測定により $< 40\text{ps}$ の高い精度で陽電子の時間を測定するマルチピクセル検出器である。「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 実験における陽電子タイミングカウンターについて (3,4,5 章)、位置較正についての測定・解析・結果 (6,7,8 章) となっており、展望を交えつつ 9 章でまとめる。

第 2 章

$\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 崩壊

本章では、荷電レプトンフレーバーの破れ (cLFV) の 1 つである $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 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想されている。

2.1 標準模型におけるミューオン

現代素粒子物理学において、標準模型は現状研究されているエネルギー領域における多くの実験的事実と整合する、理論的な枠組みとなるような理論モデルである。

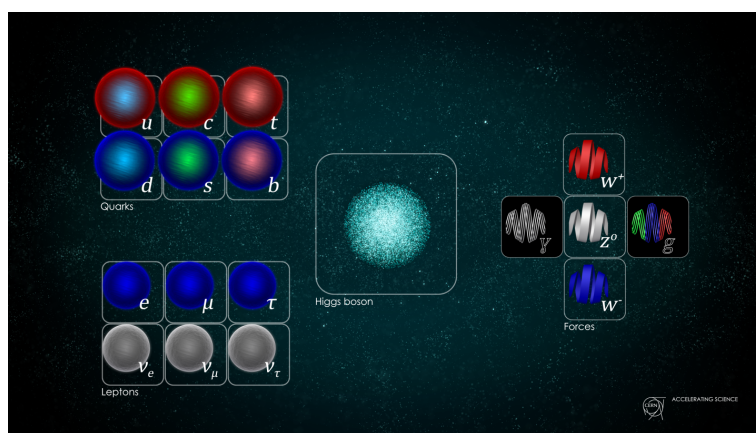


図 2.1: 標準理論における素粒子 [3]

2.2 ミューオンに関する公称値

ミューオン μ^+ の基本性質を表 2.2 に、各崩壊モードへの分岐比を表 2.2 にまとめる。主な崩壊モードは、ミシエル崩壊と呼ばれる μ が γ を伴わず ν を伴って e へと崩壊するモードである。

これをこうしてこうすると、 $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 崩壊の分岐比は 10^{-100} 万 となり、標準理論において cLFV は禁止されていると言える。ただしこれに必然性は無い。

| | |
|------------|--|
| 質量 | $105.6583745 \pm 0.0000024 \text{ MeV}$ |
| 寿命 | $(2.1969811 \pm 0.0000022) \times 10^{-6} \text{ s}$ |
| 異常磁気モーメント | $(11659209 \pm 6) \times 10^{-10}$ |
| 電気双極子モーメント | $< 1.8 \times 10^{-19} e \text{ cm (95\% C.L.)}$ |

表 2.1: ミューオンの基本性質 [2]

| 崩壊モード | 分岐比 (測定値) | 信頼区間 | 備考 |
|---|--------------------------------|------|---|
| $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu$ | $\sim 100\%$ | | |
| $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu \gamma$ | $(6.0 \pm 0.5) \times 10^{-8}$ | | $E_e > 45 \text{ MeV}, E_\gamma > 40 \text{ MeV}$ |
| $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu e^+ e^-$ | $(3.4 \pm 0.4) \times 10^{-5}$ | | |
| $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ | $< 4.2 \times 10^{-13}$ | 90% | cLFV |
| $\mu^+ \rightarrow e^+ e^- e^+$ | $< 1.0 \times 10^{-12}$ | 〃 | 〃 |
| $\mu^+ \rightarrow e^+ 2\gamma$ | $< 7.2 \times 10^{-11}$ | 〃 | 〃 |
| $\mu^+ \rightarrow e^+ \bar{\nu}_e \nu_\mu$ | $< 1.2 \times 10^{-2}$ | 〃 | 〃 |

表 2.2: ミューオンの崩壊モードと分岐比 [2]

2.3 標準理論を超える物理において

(・これまでの $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 探索)

~~~~~ 準備中 ~~~~~

(・他の cLFV 探索)

ミューオンの cLFV から新物理を探る大規模な実験は国内外で多く存在する。代表的なもので  $\mu \rightarrow e N$  転換を探索する Mu2e 実験 (フェルミ研究所)、COMET 実験 (J-PARK) や、 $\mu \rightarrow eee$  崩壊を探索する Mu3e 実験 (PSI) がある。いずれの過程も相互作用の数が  $\mu \rightarrow e \gamma$  崩壊より多いため、その相対分岐比は  $\mu \rightarrow e \gamma$  崩壊の 100 分の 1 以下であると予想されており、目標とする分岐比感度は MEG II 実験よりも高い。

(・他の新物理の手がかり)

ミューオンの異常磁気能率からのずれ

## 2.4 実験における信号・背景事象

## 第 3 章

# MEG II 実験

### 3.1 概要

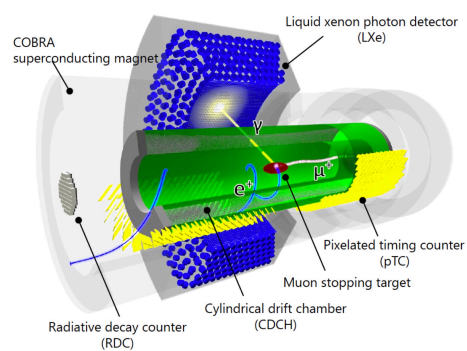


図 3.1: MEG II 実験における検出器の概観

### 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 輻射崩壞検出器 (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  $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$  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。

$$\begin{aligned}\sigma_{t_{vertex}} &= \sqrt{\sigma_{t_{e^+}}^2 + \sigma_{t_\gamma}^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{\sigma_{l_{e^+}}^{CDCH}}{c}\right)^2 + (\sigma_{t_{e^+}}^{pTC})^2 + \sigma_{t_\gamma}^2}\end{aligned}\quad (4.1)$$

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、 $\sigma_{l_{e^+}}^{CDCH}$  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、 $\sigma_{t_{e^+}}^{pTC}$  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  $50 - 70\text{ps}$ 、CDCH による陽電子軌跡の不確かさは  $\sigma_{l_{e^+}}^{CDCH}/c \sim 70\text{ps}$  と見積もられているため、 $\sigma_{t_{vertex}} \leq 84\text{ps}$  を達成する (3.7) ためには、pTC は  $\sigma_{t_{e^+}}^{pTC} \sim 46\text{ps}$  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  $70\text{ps}$  程度であった。

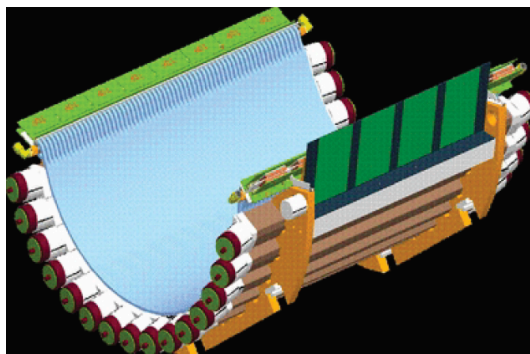


図 4.1: MEG 実験における陽電子タイミングカウンター (TC)

#### 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。

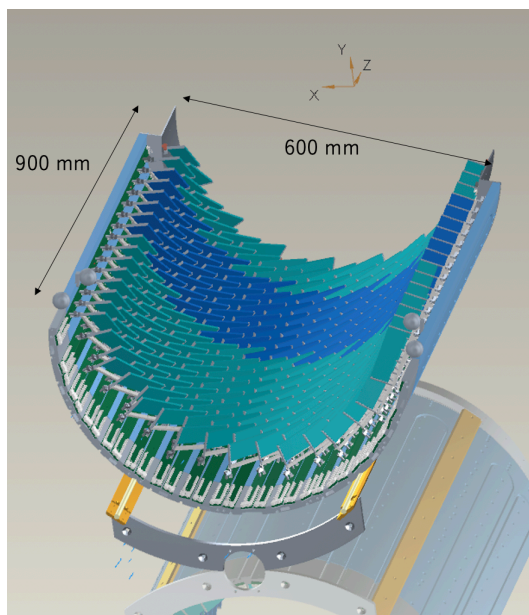


図 5.1: CAD における pTC(上流側) の概観

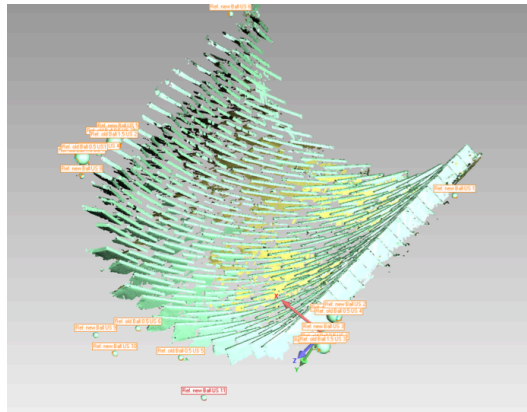


図 5.2: pTC(上流側) の 3D スキャンデータ

## 5.1 3D スキャンによる位置較正

### 5.1.1 3D スキャンにおける測量

### 5.1.2 実験エリアにおける測量

### 5.1.3 測量基準点 (reference point)

### 5.1.4 スキャンデータの解析

### 5.1.5 結果

### 5.1.6 考察

## 5.2 軌跡再構成による位置較正の試み

### 5.2.1 原理

### 5.2.2 課題

### 5.2.3 考察

## 5.3 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

## 謝辭



第Ⅰ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

- [1] A. M. Baldini et al., Search for the lepton flavour violating decay  $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$  with the full dataset of the MEG experiment. *Eur. Phys. J., C* 76 (8) (2016) 434.  
doi: 10.1140/epjc/s10052-016-4271-x.
- [2] P.A. Zyla et al. Review of Particle Physics. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, Volume 2020, Issue 8, August 2020, 083C01.  
doi: <https://doi.org/10.1093/ptep/ptaa104>
- [3] CERN website. <https://home.cern/science/physics/standard-model> , cited 14th December 2020.