

MEG II 実験陽電子タイミングカウンターの 製作および較正と 大強度ミュオン粒子ビームによる性能評価

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

中尾 光孝

1 研究背景

標準理論を超える新しい物理の探索は現代の素粒子物理学における最重要課題である。標準理論における素粒子のうち、クォークやニュートリノについては世代間混合現象が見つかったが、荷電レプトンにおいては見つかっていない。しかし、大統一理論やニュートリノ振動の起源となる新しい物理は、クォークやニュートリノだけでなく、荷電レプトンにも測定可能な大きな世代間混合現象 (荷電レプトンフレーバーの破れ) を引き起こすことがわかっている。標準理論では起こり得ないこの混合現象の発見は、標準理論を超える新しい物理の決定的な証拠となる。

MEG II 国際共同実験は、荷電レプトンのうちミュオン粒子 (μ) と電子 (e) に注目し、荷電レプトンフレーバーの破れの1つである $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 崩壊の探索により、新しい物理を発見することを目指して現在準備中である。前身の MEG 実験では、世界最高感度で探索を行ったものの、発見には至らず、ミュオン粒子崩壊の主なモードに対する分岐比に $Br(\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma) < 4.2 \times 10^{-13}$ (90% C.L.) の制限を与えた。MEG II 実験では、これを越える分岐比感度 4×10^{-14} を達成するため、全ての検出器の分解能を2倍程度向上させる計画である。

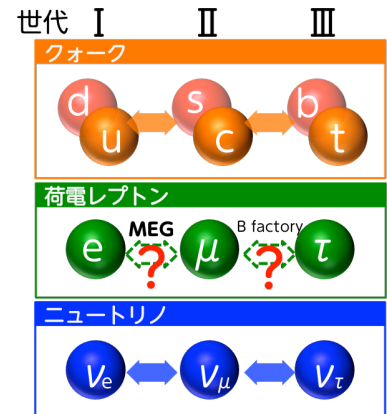


図1 標準理論のフェルミオン。クォーク、レプトンについて3つの世代構造がある。

2 陽電子タイミングカウンター

中でも、崩壊粒子の時間の測定は、主要なバックグラウンドである偶発事象を排除するために最も重要と考えられる。MEG II 実験陽電子タイミングカウンターはミュオン粒子崩壊から放出される陽電子の時間を測定する検出器で、512個の「ピクセル」から構成される(図2)。各「ピクセル」は、厚さ5 mm、 $120 \times 40 \text{ mm}^2$ (または $120 \times 50 \text{ mm}^2$)のプラスチックシンチレータの両端に複数のシリコン光検出器 (SiPM) を接着したものであり、単独で70~90 psの時間分解能を持つ。これを1つの陽電子が複数のピクセルを通過するように配置し、複数のピクセルで陽電子の時間を測定することによって、MEG 実験に比べて約2倍改善する時間分解能 (35 ps) を実現する。一般に、陽電子が N_{hit} 個のピクセルにヒットした場合の時間分解能 $\sigma_{\text{all}}(N_{\text{hit}})$ は式(1)で記述することができ、単一のピクセルで測定した時間分解能と比べて $1/\sqrt{N_{\text{hit}}}$ で向上する(第1項)。一方で、複数のピクセルで測定する際には、ピクセル間での時間のずれによる不定性を考え

る必要があり, $1/\sqrt{N_{\text{hit}}}$ で小さくなる項 (第 2 項) と N_{hit} によらず一定の寄与をする項 (第 4 項) に分けられる. なお, 第 3 項は多重散乱による寄与である.

$$\sigma_{\text{all}}(N_{\text{hit}}) = \sqrt{\frac{\sigma_{\text{intrinsic}}^2}{N_{\text{hit}}} + \frac{\sigma_{\text{inter-pixel}}^2}{N_{\text{hit}}} + \sigma_{\text{MS}}^2(N_{\text{hit}}) + \sigma_{\text{const}}^2} \quad (1)$$

この複数ヒット測定による時間分解能の向上は, 少数のプロトタイプピクセルをビームに対して一列に配置した陽電子ビーム試験によって実証済みである. そこで, MEG II 実験開始へ向けて本研究では, 512 個のピクセルを製作し, さらに 512 個のピクセル間の相対的な時間較正方法を開発した. 最終的に実際の MEG II 実験環境下で時間分解能を評価した.

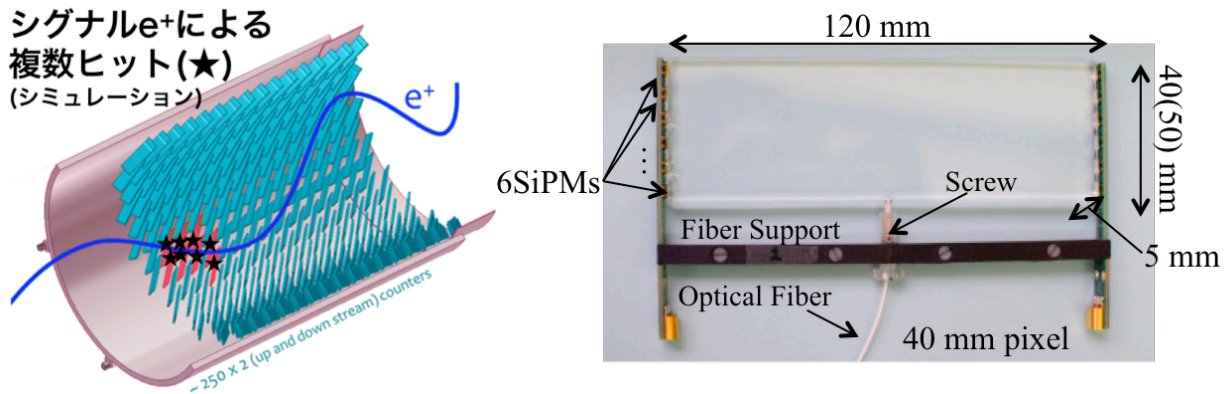
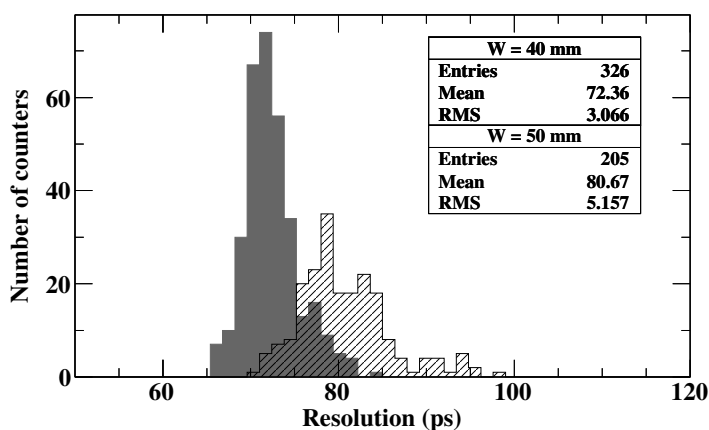


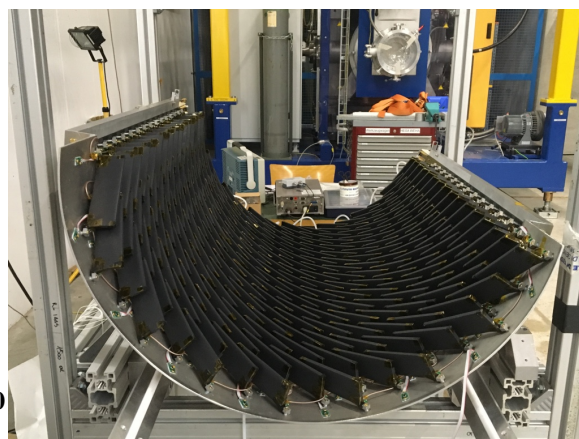
図 2 陽電子タイミングカウンターの概念図 (左). 全部で 512 個 (左図では片側分なので 256 個) の「ピクセル」 (=シンチレーションカウンター) で構成される. 1 つの「ピクセル」は右図のようにプラスチックシンチレータの両端に 6 つずつの SiPM を接着した構造である. シンチレータの高さには 40 mm と 50 mm の 2 種類がある. 底面には時間較正用のレーザー光を入射するためのファイバーが装着されている. インストールするにはさらに反射材と遮光シートを巻いた.

3 実機製作

実機製作においては, ピクセルを構成する 6000 個以上の SiPM, 500 枚以上のプラスチックシンチレータの個別試験を行った. SiPM については個別試験の結果をもとに, シンチレータの同じ端に接着する 6 つずつの組み合わせを決定した. しかし, 納品された SiPM には 3 種類の異なる IV 特性をもつものが存在することがわかったため, 各特性ごとにオーバー電圧を調整することで検出器全体への影響を抑えた. また, シンチレータについては, 個別試験で時間分解能のばらつきが大きいことがわかり, 時間分解能が悪いシンチレータについては企業に対してフィードバックをして取り換えることで対応した. その後, SiPM とプラスチックシンチレータを接着し, ピクセルの完成後には放射線源を用いて性能評価を行った. 以上のように, 製作の各段階で各部分の性能評価を行うことで, 性能のばらつきを抑えつつ, MEG II 実験で使用する全てのピクセルの製作を完了した. 図 3 に測定結果と製作が完了した様子を示した.



(a) 全ピクセルの時間分解能の分布



(b) 完成した陽電子タイミングカウンター (下流)

図3 (a) 製作した全ピクセルの時間分解能の測定結果を 40 mm のピクセルと 50mm のピクセルに分けて示した. ピクセル単体の時間分解能として 70–80 ps を得た. ピクセルの高さによる時間分解能の違いは, シンチレータの端での SiPM の被覆率の違いによる. (b) ピクセルごとの性能評価後に実際にインストールした後の写真.

4 時間較正方法の開発

高精度な時間測定を目指す陽電子タイミングカウンターではピクセル間の時間較正が欠かせない. 時間較正がうまく適用できていない場合には, 式 (1) の第 2 項 ($\sigma_{\text{inter-pixel}}$) や第 4 項 (σ_{const}) の寄与が増え, 最終的な複数ヒットでの時間分解能の悪化につながる. 時間較正方法の開発にあたっては時間分解能の悪化を 10% 以下に抑えるための目標値として, 第 2 項については 30 ps, 第 4 項については 10 ps と設定した. 本研究では各ピクセル間の時間較正について, ピクセルにレーザー光を同時照射する方法と, ミュー粒子崩壊の陽電子を用いる方法の 2 つの相補的な方法を開発した.

1 つ目のレーザーを用いる方法は, 各ピクセルに同一光源のレーザー光を照射することで, 直接各ピクセルの時間オフセットを測定する (図 4). この方法を実現するために, レーザー源, レーザー光を分配するスプリッターやファイバー, 最終的に入射するピクセルを含んだレーザー較正システムを考案し, 実際に各部分の試験を経て建設した. さらに, この方法における時間較正精度の評価も行い, 式 (1) の第 2 項に対する寄与として 24 ps であることがわかり, 目標とする時間分解能を十分に達成できる較正方法であることを示した.

2 つ目の陽電子を用いる方法は, 主なミュー粒子崩壊のモードであるミシェル崩壊 ($\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu$) の陽電子の軌跡情報を使ってピクセル間の飛行時間を計算することで, ピクセルごとの時間オフセットを測定する. この方法の研究開発を, 実際の実験状況を踏まえたモンテカルロ・シミュレーションによって生成したデータを用いて評価を行った. その結果, ピクセルの位置によってバイアスが存在することがわかった. これは時間分解能の評価の際には式 (1) の第 4 項に寄与するが, 値としては 11 ps に抑えることができ, 目標とする時間分解能を達成できる較正方法であることを示した.

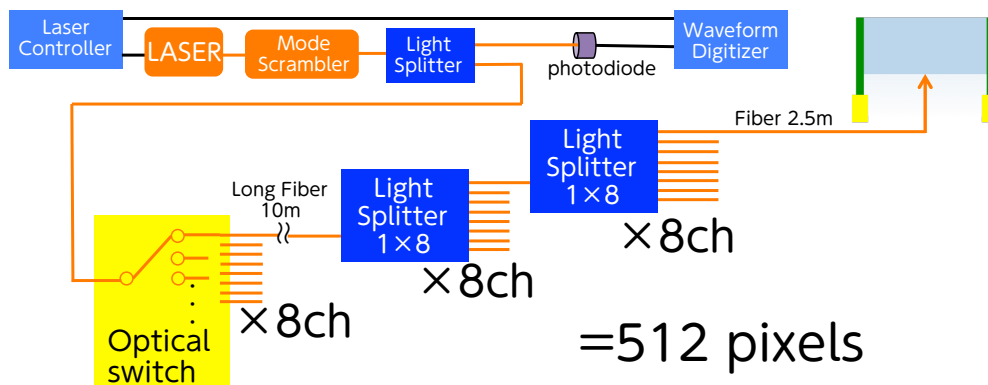
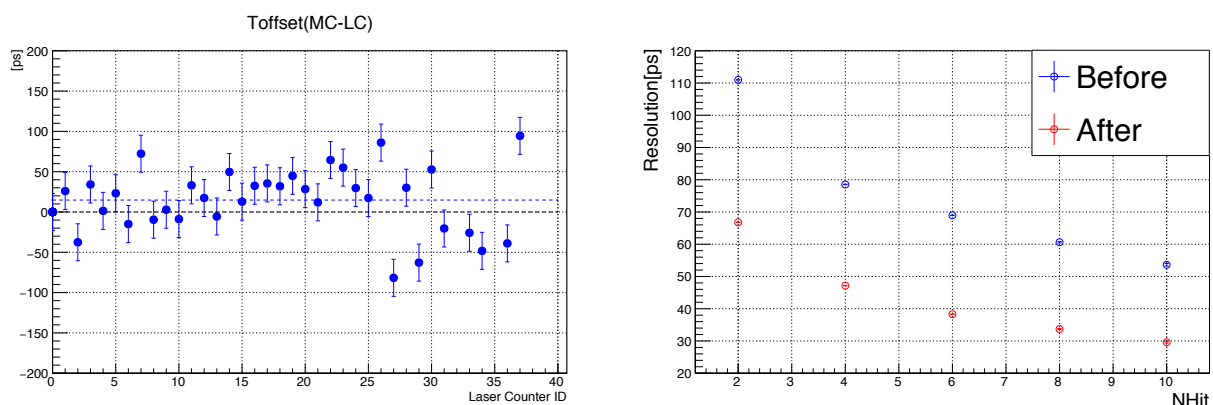


図4 開発したレーザー較正法の概念図.

5 大強度ミュオン粒子ビームを用いた性能評価 (Pilot Run 2016)

実際に製作したピクセルと開発した時間較正システムを、MEG II 実験ビームラインの陽電子スペクトロメータマグネット内に設置し、本実験と同じ大強度ミュオン粒子ビームを用いて性能評価を行った。取得したデータに対して、開発した2つの時間較正方法を適用し、各方法から独立にピクセルごとの時間オフセットのずれを計算した。Pilot Run 2016 全期間に渡って時間オフセットをモニターすることに成功し、同時に2つの較正方法の整合性と相補性、時間オフセットの安定性を確認した(図5(a))。また、ミュオン粒子崩壊からの陽電子の時間測定についても MEG II 実験環境下で目標値 (35 ps) を上回る分解能 31–34 ps を達成した(図5(b))。



(a) 時間オフセットの整合性

(b) 複数ヒットでの時間分解能の評価

図5 (a) ミシェル較正法による時間オフセットの値からレーザー較正法による時間オフセットの値を差し引いた。レーザーシステムを導入した40ピクセルについての結果を示した。2つの較正方法の差のばらつきは標準偏差で39 psであった。Physics Runに向けてはミシェル較正法とレーザー較正法の双方でさらに精度を改善する予定である。(b) ヒット数に対する時間分解能の変化を時間較正前後で比較した。Before(青), After(赤)がそれぞれ較正前後に対応する。時間較正を適用することで時間分解能を改善することができた。陽電子の平均ヒットピクセル数である9ヒットにおいて、時間分解能の目標値を上回る性能を達成した。