

# 論文の内容の要旨

## Positron Timing Measurement to Search for Lepton Flavor Violating Decay in MEG II

### (荷電レプトン非保存現象探索のための MEG II実験における陽電子時間測定)

西村 美紀

素粒子物理学において、標準模型は様々な現象を説明してきたが、理論実験の両方から、それにとって代わる新し物理が求められている。ミュー粒子のレプトンフレーバー非保存現象である  $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$  崩壊を世界最高感度で探索することは、標準模型を超える新物理へと迫ることができる。本論文では、二体崩壊である  $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$  崩壊探索において、背景事象と区別ために必須である陽電子の時間測定法を確立し、これによって世界最高感度での探索を行うことが可能であることを示している。

素粒子物理学の標準模型は、 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$  ゲージ対称性を基礎とした理論であり、一定の成功を収めている。しかし、ゲージ結合定数が独立であり真の統一理論になっていないことや、ニュートリノ振動が発見されたことなどからこれを超える新物理の存在は確実である。注目すべき点は、標準模型では、レプトンフレーバー ( $e, \mu, \tau$ ) の保存は偶然現れたもので、ゲージ対称性からの要請ではないことである。このため、多くの新物理モデルでレプトンフレーバーを保存しない相互作用 (LFV) が考えられる。新物理の有力な候補である超対称性モデルなどでは、理論の自然さから数 TeV 領域に新物理があると予想されている。この場合、特に荷電レプトンにおける LFV (cLFV) は、実験で測定可能な大きさ ( $10^{-11}$ – $10^{-14}$ ) で起こると言われている。標準模型では cLFV は実験ではニュートリノ振動の寄与を入れたとしても測定できないほど小さい分岐比しかもたないため、観測そのものが新物理の発見となる。

cLFV 探索の先陣を切っているのが MEG 実験である。MEG 実験で行った  $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$  崩壊探索は、世界最高感度での探索に成功し崩壊分岐比に  $4.2 \times 10^{-13}$  という強い制限を設けている。TeV 領域の新物理を棄却しはじめており、いつ発見されてもおかしくない状況である。

このため、さらなる探索を目指し、MEG II 実験へのアップグレードを行い、感度を一桁あげる。MEG 実験では、測定器のレート耐性の限界により、加速器の最大強度を半分まで減らしてデータ取得を行っていたため、ビーム強度を最大限まであげる。また、それに伴い増加する背景事象も測定器の開発により大幅に削減しなければならない。このため MEG II 実験では、ビームレート耐性があり、かつ高精度な測定器にアップグレードすることが必須である。

$\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$  崩壊探索では、支配的である偶発的背景事象を削減することが最も重要なことである。シグナルは、単純な 2 体崩壊であり、反対方向に同じエネルギーを持って同時に陽電子と光子が放出される。一方、偶発的背景事象は、ミュー粒子の通常の崩壊である Michel 崩壊から放出される陽電子と物質との相互作用で生じる光子が、偶発的に同じ時間に同じエネルギーで反対方向に再構成されたものである。このことから、陽電子と光子それぞれについて、エネルギー、時間、向きを良い精度で測定する必要がある。

この中でも、陽電子と光子の相対的な時間 ( $T_{e\gamma}$ ) の分布は、シグナルはピークを作るのに対し、背景事象は均一に分布するため、時間測定の分解能に応じて背景事象を線形に削減することができる。MEG 実験での時間分解能は 126 ps であり、光子側が 67 ps、陽電子側が 107 ps

と陽電子側で制限されていた。このため MEG II 実験で陽電子側の時間測定の精度をあげることが必須である。

陽電子は超電導磁石によって曲げられるが、大量に来る Michel 崩壊からの陽電子を効率よく測定するために MEG II 実験では、MEG 実験でも用いられた特殊勾配磁石を用いる。陽電子の時間は、その中に設置されたタイミングカウンターで測定され、この内側の立体交差型のワイヤードリフトチェンバーで再構成された飛跡から崩壊点での時間が再構成される。MEG II 実験では、飛跡再構成からの寄与が 75 ps から 15 ps と改善されるため、MEG 実験で 76 ps であった陽電子タイミングカウンターの時間分解能がほとんどそのまま陽電子側の時間分解能となる。一方、光子側では、50–70 ps の時間分解能となる。以上より、陽電子タイミングカウンターが光子側と同等もしくはそれ以下にするためには、数十ピコ程度の時間分解能を持つ必要がある。

MEG II 実験での新しい陽電子タイミングカウンターには、新型の半導体光検出器 SiPM を取り付けた  $120 \times 40 \times 5 \text{ mm}^3$  のシンチレーターカウンターを 512 個設置する (Fig. 1、2)。細分化することによって、カウンター単体でのヒットレートは小さくなり、高いレート (数 MHz) で測定器に入る Michel 陽電子にも耐えうる。さらにシグナル陽電子は平均で 8–9 個 (MC) のカウンターで時間が測定されるため、時間分解能が大幅に向上する。

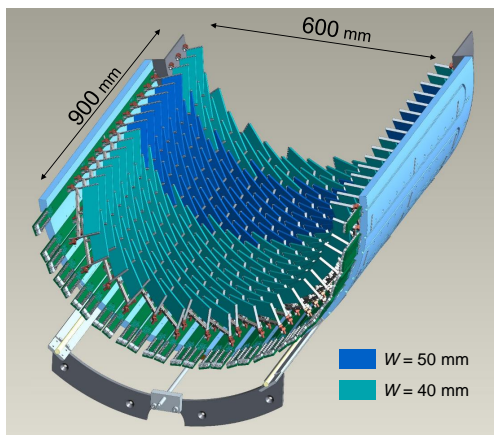


Figure 1: Overview of the timing counter



Figure 2: Picture of the single counter

この細分化された陽電子タイミングカウンターは 30–50 ps 程度の時間分解能を出すには、シングルカウンターで 100 ps を下回る程度の時間分解能を出すことが重要である。カウンターのデザインなどを最適化し、512 個のカウンターを作成した。Fig. 3 に示すように量産したカウンターで 100 ps 以下の時間分解能を達成した。

また、たくさんのカウンターを用いて測定を行うために必要な、カウンター間の時間較正や同一陽電子起原のヒットをまとめるクラスタリングアルゴリズムの開発なども行った。

以上のような研究を得て、陽電子タイミングカウンターは建設と設置を終え、2017 年 11 月–12 月に最終的なデータ取得回路を用いて、MEG II 実験のビームラインでパイロットランを行った。細分化されたこの新しい陽電子タイミングカウンターでは、実際に陽電子のヒットレートが抑えられることが確認された。一方、細分化されることによって懸念される、カウンター間での時間のずれも、レーザーを用いた方法と取得した陽電子データを用いて行う方法両方で成功した。

最終的に陽電子タイミングカウンター実機において、Fig. 4 に示すように複数ヒットによって時間分解能が向上することが確認され、8 個のカウンターでは 30 ps 以下の時間分解能を達成した。この結果を MC で得られたシグナル陽電子のヒット数分布 (Fig. 5) でスケールすると、シグナル陽電子に対して、38.5 ps という時間分解能での測定が可能であり、MEG 実験での時間分解能 76 ps からの大幅な改善を示している。

再構成される崩壊点での時間測定は、シミュレーションで予想されるドリフトチェンバーからの寄与 (14.8 ps) も含めると 41.2 ps の時間分解能が期待される。また、陽電子の検出効率は、56.1%とシミュレーションによって見積もられる。これも、MEG 実験での 30 %に対して改善している。ドリフトチェンバーにおける飛跡再構成のアルゴリズムを改良することによって、検出効率が向上することが期待される。

光子側の時間測定は、ノイズの状況により 50 ps–70 ps になり、 $T_{e\gamma}$  の時間分解能としては、64 ps–80 ps と予想される。これを用いて、MEG II 実験の最終感度を見積もった結果を Fig. 6

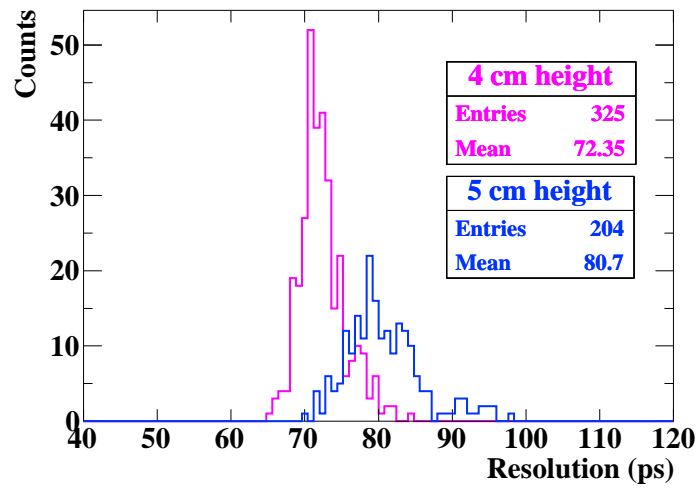


Figure 3: Resolution distribution of single counters. Magenta line show that of 4 cm height counter; Blue line, 5 cm.

に示している。3年間の物理データ取得で  $6 \times 10^{-14}$  の感度に到達することができる。

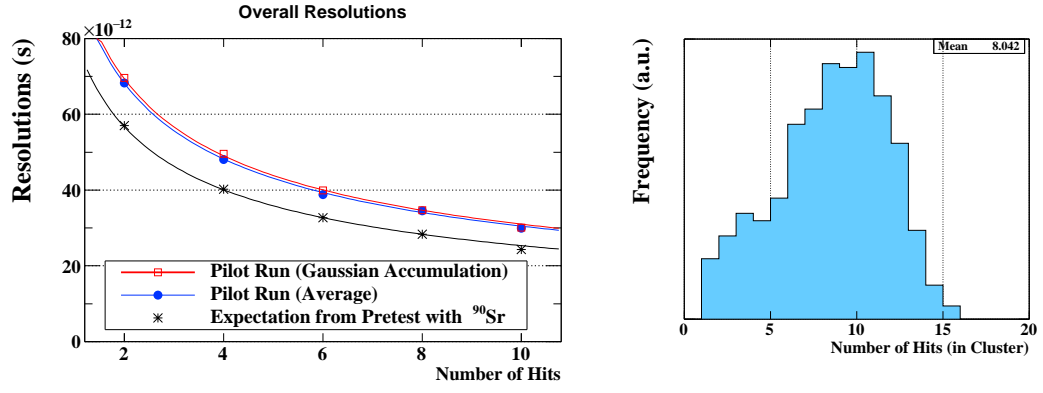


Figure 4: Obtained overall time resolution of time- signal positrons in MC ing counter

Figure 5: Number of hits from

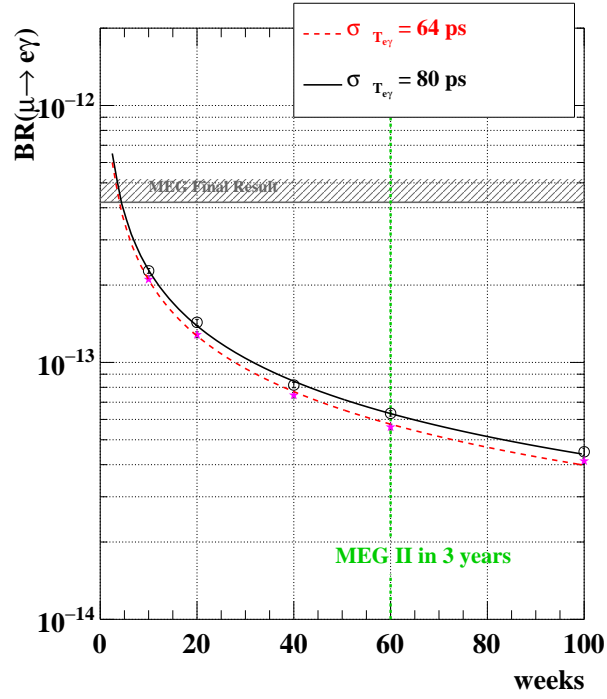


Figure 6: Expected sensitivity in MEG II