

論文審査の結果の要旨

氏名 中尾 光孝

本論文は 8 章からなる。研究目的は、スイスにあるポールシェラー研究所 (PSI) で行われた MEG 実験 ($\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 探索が主目的の実験) の全データ (2009–2013 年、 7.5×10^{14} 事象) を用いて、素粒子物理学の標準模型では説明できない $\mu^+ \rightarrow e^+ X$, $X \rightarrow \gamma \gamma$ プロセス (ME_x2G) を発見することである。

第 1 章では標準模型が完成した一方、標準模型では説明できない観測結果がある現状において、それらを説明できる洗練された理論模型 (新しい物理) の発見を目指し、 $\mu^+ \rightarrow e^+ X$, $X \rightarrow \gamma \gamma$ プロセスの探索を提案する。このプロセスは新しい要素を 2 つ持つ。1 つは標準模型では禁止されている荷電レプトンのフレーバー破れ (CLFV) の存在、もう 1 つは比較的軽いエネルギースケール (MeV 領域) の新しい物理の存在である。重いエネルギースケール由来の CLFV の存在が発見されていないこと、いくつかの実験で MeV 領域にアノマリーが観測されていることから、CLFV を通して MeV 領域の新粒子を探索する意義が説明されている。

第 2 章では Crystal Box 実験 ($\mu \rightarrow e \gamma \gamma$)、MEG 実験の 2009–2010 年データ (1.8×10^{14} 事象) を用いた ME_x2G 探索の結果等をまとめ、本論文で探索する領域を X 粒子の質量 (M_X) が 20–45 MeV、寿命が 5–40 ps と決めた。ME_x2G プロセスから生じる X, e^+ , 2 つの γ の運動学をまとめ、想定する 4 種類の背景事象について述べられている。

第 3 章では、まず本解析で用いた実験データを取得した加速器・MEG 検出器、DAQ・トリガーを説明する。PSI にある陽子シンクロトロン加速器を用いて世界最高強度のミュオンビームを生成し、ミュオン崩壊事象を MEG 検出器で測定した。MEG 検出器は e^+ を測定するドリフトチェンバとタイミングカウンタ、 γ を測定する液体キセノン検出器で構成されている。続いて、解析で用いたモンテカルロシミュレーション (MC) データ、混合データとその生成方法、解析の全体像を説明している。

第 4 章では e^+ の再構成方法とその性能評価を述べている。各ワイヤーに落としたエネルギーからクラスタを形成し、それとドリフト時間を使って荷電粒子の軌道を再構成することで運動量を測定する。タイミングカウンタの情報と組み合わせることで e^+ が生成された時間を精度良く決定する。また、実験データと MC データにおける測定値の性能、具体的には、運動量や時間情報等の分解能の違いを評価する方法とその結果をまとめた。これらを使って MC データを補正する。

第 5 章ではまず 2 つの γ の再構成方法とその性能評価を述べている。 $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ と異なり、ME_x2G プロセスでは 2 つの光子 (γ) が存在する。2 つの光子のエネルギーが重なって光電子増倍管 (PMT) で測定されるため、これを分解する手法を開発した。算出したエネ

ルギーに対して、光子の反応位置(光子と PMT の相対的な位置、液体キセノン中の反応位置・深さ)による補正等をして最終的なエネルギーを算出した。実験データと MC データの違いを評価して MC データを補正し、2つの光子の検出効率を算出した。

第6章では第4章と第5章で独立に再構成した e^+ と 2つの γ を合わせて $\mu^+ \rightarrow e^+ X$, $X \rightarrow \gamma\gamma$ 事象として評価する。 $X \rightarrow \gamma\gamma$ の X の崩壊点を得るために従来の方法に加え新たに別の手法を考案し、その2つの結果を組み合わせた初期値を用いて最尤度関数を評価し崩壊点を決定する方法を開発した。この結果を用いて、信号領域を定義する2つの変数 $t_{\gamma\gamma}$ と $t_{\gamma e}$ を算出する。 $t_{\gamma\gamma}$ は2つの γ の X の崩壊点での時間差、 $t_{\gamma e}$ はエネルギーの大きい γ と e^+ の X の生成点での時間差で、どちらも信号事象ではゼロになる特徴を持つ。

第7章と第8章では信号領域の定義、事象選択、最終結果の算出を行い、その結果について議論する。信号領域とサイドバンド領域を $t_{\gamma\gamma}$ と $t_{\gamma e}$ の2変数平面で定義する。サイドバンド領域には第2章で議論した背景事象が存在し、その組み合わせにより3種類に分類し、そこで観測される事象数から信号領域にある背景事象数を見積もる。 X 粒子の仮定する質量ごと(20–45 MeV で 1 MeV 刻み、合計 26 個の M_X 値)に事象選択の条件を最適化し、信号領域とサイドバンド領域を同時にフィットすることで結果を得る。MEG 実験の過去の同じ目的の解析と比較して X 粒子の重い領域(45 MeV)で再構成効率を約3倍改善した。観測数が0事象になる M_X 値は19個、1事象が5個、2事象が2個であり、背景事象はすべての M_X 値で1個以下であった。有意な超過事象がある信号領域はなく、最大の有意度は $M_X = 35$ MeV において 2.2σ (グローバル 1.3σ) であった。これらの結果から $\mu^+ \rightarrow e^+ X$, $X \rightarrow \gamma\gamma$ の崩壊分岐比の上限値(と下限値)を求め、 10^{-11} – 10^{-9} ($M_X = 20$ – 45 MeV)を得た。過去の MEG の結果より1桁改善し、Crystal Box 実験と比較して $M_X < 40$ MeV 領域に厳しい制限を課した。第7章の最終節と第8章は結果、改善点をまとめ、現在準備中の MEG II 実験に関する展望等が述べられている。

MEG 実験の全データを用いた標準模型では説明できない $\mu^+ \rightarrow e^+ X$, $X \rightarrow \gamma\gamma$ プロセスの直接探索で、 X 粒子質量 20–40 MeV 領域で崩壊分岐比に対して最も厳しい制限を課した。さらに、MeV 領域にはアノマリーが他の実験で観測されているため、軽い質量を持つ未知粒子を含んだ CLFV の現象の探索は重要で、十分に学術的価値がある。

なお、本論文の研究は、MEG 実験で取得したデータを用い、MEG 実験の他のメンバーとの共同研究であるが、本論文のデータ解析は論文提出者が100%主体となって行い、結果を出したものである。よって、この共同研究の成果には論文提出者の寄与が十分であると判断する。

以上のことから、論文提出者は博士(理学)の学位を受けるにふさわしい学識をもつものと認め、審査委員全員で合格と判定した。