

論文内容の要旨

An Innovative Positron Spectrometer to Search for the Lepton Flavour Violating Muon Decay with a Sensitivity of 10^{-13}

(レプトンフレーバー保存を破るミュオン崩壊事象を 10^{-13} 分岐比まで探索するための新しい高感度陽電子スペクトロメータ)

西口 創

近年相次いで報告されたニュートリノ振動現象の観測結果より、ニュートリノにおけるフレーバ非保存は確実視されている一方で、荷電レプトンにおけるフレーバ非保存事象の観測事例は未だ一例も報告されていない。ニュートリノが質量を持つように標準理論を拡張した場合に予測される荷電レプトン混合の割合は、ミュオン粒子のフレーバ非保存事象($\mu \rightarrow e\gamma$)の崩壊分岐比を例にすると、オーダーにして 10^{-50} 程度と極めて小さく観測は望むべくもない。一方、超対称性を加味した超対称性大統一理論や、超対称性シーソー機構などの新しい理論モデルの多くは $10^{-11} \sim 10^{-15}$ という非常に大きな崩壊分岐比を预言している。現在の $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索の実験感度の上限値は、米国ロスアラモス研究所において行われたMEGA実験により1999年に報告された 1.2×10^{-11} (90% C.L.)であり、実験感度を更に数桁向上することが出来れば、標準理論を越える新しい物理現象の観測が期待され、多くの理論モデルの可能性を検証することが可能となる。この荷電レプトン混合現象が近年注目を集めている理由のひとつは、その理論的な预言値が現在の実験上限値に対して、僅か数桁下にあることである。そこで、膨大な量のミュオン粒子を使うべく「世界最高強度のミュオン粒子ビーム」を利用し、その膨大な雑音事象の中から極めて少ない事象を検出するために「 $\mu \rightarrow e\gamma$ 検出に特化した超高性能検出器」を用いて、現状の実験感度を100倍向上させ、一挙に理論预言領域を探索する実験(MEG実験)を、東京大学の森が中心になり1999年に提唱した。MEG実験はスイス国立ポールシェラー研究所にて稼働中の現在世界最高強度のミュオン粒子ビーム(毎秒 3×10^7 個のミュオン粒子)を使い、東京大学素粒子物理国際研究センターを中心とした日本グループと、スイス、イタリア、ロシアおよび米国のグループによる国際共同プロジェクトとして進められている。

この実験の成否は、静止したミュオン粒子からの2体崩壊で放出される比較的低エネルギー(52.8 MeV)の γ 線と陽電子を、いかに精度良く高頻度で検出出来るか、が鍵を握る。更に、いかにして雑音事象の頻度を低減することが出来るか、が二つ目の鍵を握る。実際、現在の上限値であるMEGA実験の結果は、検出器の分解能の限界と膨大な雑音事象が故に、実験感度が制限されてしまっていた。そこでMEG実験では、液体キセノンを用いた新しいタイプの γ 線検出器と、特殊勾配磁場を利用した高計数率に耐え得る荷電粒子スペクトロメータを開発し、これらの困難を克服することを目指している。

前述の通り、MEGでは毎秒 3×10^7 個のミュオン粒子崩壊頻度という非常に高計数率環境で、精度良く陽電子を検出しなくてはならない。従来のドリフトチェンバーを用いて、このような高計数率化で高精

度測定をすることはほぼ不可能であるため、MEGでは特殊な磁場勾配を持たせた超伝導電磁石を採用することによりこの問題を解決した。この特殊な勾配磁場は、中央部分を窪ませたソレノイドコイルの巻き数と巻き密度を調節することによって実現されており、中心部分でおよそ1.8T、外縁部では0.4Tという大きな磁場勾配を持たせてある。この磁場勾配のおかげで、検出器中央に設置されたミュオン粒子停止標的から放出された陽電子は、速やかに飛跡検出器の外へと掃引される。また通常の一様磁場の場合、荷電粒子の磁場中での回転半径はその放出角度に依存するが、磁場の勾配を調節することでこの角度依存性を無くすることが可能になる。そのため、回転半径は放出角度に依存せず、その運動量のみ依存することになる。この特性を利用し、MEGではドリフトチェンバーを、ミュオン粒子の崩壊スペクトル(Michelスペクトル)の上限部分(52.8MeV付近)のみに感度を持つように、すなわち回転半径の大きな領域にのみ選択的に配置し、更に高計数率環境での安定動作を可能にした。このような特殊磁場を採用することで高計数率下での安定動作を実現することが出来るが、前述した通り、MEG実験を成功に導くためには、高計数率下での高精度検出と同時に、大幅な雑音事象の低減も実現しなくてはならない。そのため、荷電粒子スペクトロメータで用いる飛跡検出機を極限まで低物質量化することにより、検出精度の向上と雑音事象の低減の双方を可能にした。

通常ワイヤチェンバーのワイヤには、相当な張力を掛けて製作されるため、ある程度強固な構造物が必要になるが、それは当然物質量の増加を意味する。MEG実験では、膨大なミュオン粒子からの崩壊陽電子がそれらの構造物に当たることになり、 γ 線検出器に対して大きな雑音源となる。そのためMEG実験では、チェンバーのフレームのうちミュオン粒子ターゲットに向けた辺の構造物を一切取り外す、という思い切った構造を採用した。当然、製作に際し力学的な条件は極めて困難なものになったが、1年に及ぶ試行錯誤の末、このオープンフレーム構造でのチェンバーの作成に成功し、大幅な低物質量化に成功した。またこのフレーム構造の開発と並行して、カソードを担うフォイルの低物質量化も進め、ポリミド加工工場を訪ね、共同で超薄型でパターン印刷まで盛り込んだフォイルの開発にも成功した。これらの成果により、実験の要求を満たすドリフトチェンバーを完成することに成功し、最終的なスペクトロメータとして組み上げた際(16台のドリフトチェンバーモジュールからなる)、信号陽電子の飛跡が通過する平均物質量を0.002放射長単位にまで低減することを可能にした。

この低物質量化に加え、MEGの目指す実験感度をより確実なものとするためには、低運動量の荷電粒子の飛跡検出において最大の分解能低下要因であるクーロン多重散乱の影響を考慮にいれ、これを効果的に低減するようなアルゴリズムの開発が必要不可欠である。そのため、飛跡検出アルゴリズムはカルマンフィルターに代表される逐次的なフィルター手法を基に開発した。また、詳細なモンテカルロシミュレーションの開発は必須であり、物理事象の生成から検出器内での詳細なエレクトロニクスの再現まで含めたシミュレーションソフトウェアを開発した。

スペクトロメータの建設は2007年夏に完了し、その後速やかに検出器の立ち上げ並びに較正作業を開始し、2ヶ月のエンジニアリングランを通してすべての較正手順を確立した。また、較正作業完了後、大量のミュオン粒子を計画通りの頻度で照射し、大強度ミュオン粒子の照射環境で動作可能であることを証明し、そこで得られたデータを解析しスペクトロメータの性能を評価した。数台のドリフトチェンバーが動作不良を起こしたため、2007年のデータでは計画通りの性能を発揮することが出来なかったが、この性能の劣化分も含めたモンテカルロシミュレーションの結果、ドリフトチェンバーの補修が済み全台数が稼働すれば、計画通りの性能が実現可能であることを実証した。また、これらの動作不良の原因は完全に把握されており、現在修復作業はほぼ完了している。

これら今回のエンジニアリングランを通じた実証実験の結果、2008年度のMEG実験のデータ取得によって、現在の $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊分岐比に対する上限値を2桁向上させる感度が実現出来ることが証明された。この実験感度をもって探索すれば、荷電レプトンにおけるフレーバー物理の理解を大いに進めることが可能となる。