Osaka University Knowledge Archive

Title	Development of a burst-tolerant spectrometer system for DeeMe experiment
Author(s)	長尾, 大樹
Citation	大阪大学, 2024, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/98711
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

Osaka University

様式３

論　文　内　容　の　要　旨

氏　名　（長尾大樹　　）	
論文題名	Development of a burst-tolerant spectrometer system for DeeMe experiment (DeeMe実験におけるバースト耐性スペクトロメータシステムの開発)

論文内容の要旨

素粒子物理学における標準模型では、荷電レプトンファミリー数を破るような過程（charged Lepton Family number Violation: cLFV)は禁止されている。一方、様々な標準模型を超えた物理においてはその存在が予言されており、その探索は盛んに研究されている。μ-e転換過程はそうしたcLFVの一つであり、原子の電子軌道上にとらわれたミューオンがニュートリノを伴わず電子を放出する現象である。これは現実的に観測可能なレベルの分岐比が予言されており、現在も多くの実験で探索されている。

DeeMe実験はJ-PARC MLF H-Lineで行われるμ-e転換過程探索実験であり、現在与えられている実験上限値を超える精度での実験を可能としながら、実験装置の規模を大幅に抑えることができる非常に独創的な研究である。一般的な実験ではビームラインでミューオンを引き出し標的に静止させて信号電子を観測するが、本実験ではMLFのミューオン生成標的から直接信号電子を観測する。瞬間ヒットレートで100 GHz/mm^{2}程度のプロンプトバーストの数μsの信号電子を測定する必要があるため、バーストにより飽和しない検出器が必要となる。そのため、本実験では高速かつダイナミックにガスゲインをコントロールできるMWPC (HV-switching MWPC)を開発し、個々の検出器が実際にバースト相当のビームの数μs後の信号電子を測定することに成功した。

本研究では、次の段階としてこれら4台のMWPCを用いてスペクトロメータを構成し、電子の運動量を測定する実験を行った。またこの実験で得られたMWPCの信号から電子の運動量を得るまでの一連の解析フレームワークを開発し、その結果をモンテカルロシミュレーションと比較するデモンストレーションを行うことでμ-e転換探索までの手順を整えた。MWPCから読みだされる波形は、そのゲインをコントロールする動作によりベースラインが平坦ではないため信号を分離する方法が必要とされ、ベースラインテンプレートを作成する手法を確立した。また、信号からヒット位置を割り出し粒子の軌跡を再構成、その運動量を得ることができた。これによりDeeMeにおけるH-Lineでの本番実験に備えて一連の解析ワークフローを構築し、加えてその過程で起きうる問題を洗い出し解決または解決までの筋道を示した。さらにそのスペクトルがよく知られているミューオン崩壊電子の運動量スペクトルや、炭素標的では初となるDIO（Decay In orbit）スペクトルを測定しシミュレーションと比較・最適化の手順を構築した。また、本番実験でも必要になるであろう系統誤差の見積もり方法についても本研究で得られたデータを用いて議論した。

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名　（　長尾大樹　）		
論文審査担当者	（職）	氏　名
	主 査　教授	青木 正治
	副 査　教授	南條 創
	副 査　准教授	嶋 達志
	副 査　准教授	大田 晋輔
	副 査　准教授	吉田 斉

論文審査の結果の要旨

本論文「Development of a burst-tolerant spectrometer system for DeeMe experiment」（DeeMe 実験におけるバースト耐性スペクトロメータシステムの開発）は、荷電レプトンファミリー数を破る反応の一つであるミュー粒子・電子転換過程($\mu - e$転換過程)を探索する実験である DeeMe 実験に関して、それを実現するために必須となる基幹装置の開発に関して報告したものである。

$\mu - e$転換過程は、負電荷ミュー粒子を原子軌道上にトラップしているミューオニック原子が、ニュートリノを伴わずに電子を放出する現象であり、ビッグバン直後の高いエネルギースケールに関連する物理を研究する手段として世界的に注目されている反応過程である。DeeMe 実験は、陽子ビームが照射される炭素標的中に大量のミューオニック原子が生成されるという現象に着目し、SINDRUM-II 実験が与えている現在の分岐比上限値7×10^{-13}を超える精度での測定を可能とした独創的な研究である。

DeeMe 実験では、炭素標的中のミューオニック炭素原子から発生すると期待される$105\ \mathrm{MeV}/c$の信号電子を、大立体角ミュー粒子ビームライン(H ライン)で実験室まで取り出し、双極子電磁石を用いたスペクトローメータでその運動量を分析する。H ラインで輸送される荷電粒子の大部分はパルス陽子ビームに同期して発生する即発二次粒子であり、その瞬間ヒットレートは$100\ \mathrm{GHz}/mm^2$にも達すると予想される。信号電子はこれら即発粒子から数μ秒程遅延して飛来するため、即発タイミングをやり過ごして遅延タイミングで動作する特殊なスペクトロメータシステムの開発が必須であった。

本論文では、DeeMe 実験用に開発されたバースト耐性 MWPC4 台を同期させて同時に運用する電子スペクトロメータを J-PARC MLF D2 実験エリアに実際に組み上げ、ミュー粒子から放出される電子のデータを収集することに成功した。取得したデータの解析では、波打つベースライン上に存在する信号パルスを高い信号対ノイズ比で取り出す波形解析アルゴリズムを開発した。電子の運動量スペクトルを再構成し、モンテカルロ計算と組み合わせることによって、ミッシェルエッジを用いた運動量校正やミッシェルスペクトルを用いた運動量アクセプタンス校正を実施してみせた。これら一連の解析手順は、H ラインにおける本測定でも使用することを前提として開発されている。

このように、本論文ではバースト耐性 MWPC を用いたバースト耐性スペクトロメータを初めて統合運用し、バースト耐性 MWPC の特性に起因する様々な現象や課題に取り組んだ。本論文で示された解析方法や手段は、$\mu - e$転換過程の測定を進める上で重要な知見である。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として十分価値あるものと認める。