

論文審査の結果の要旨

氏名 神田 聡太郎

本論文は、以下の10章から構成されている。第1章は、論文全体のイントロダクションである。基底状態ミュオニウムの超微細構造の説明と、その精密測定が持つ物理的な意義を説明した後、過去の実験結果をまとめている。次に、過去の実験が連続したミュオンビームを用いており、大強度ビームを用いると事象の分離が不可能となり、そのため強度を制限せざるを得ず、測定精度を向上させられないという根本的な困難の存在を示している。そして、本論文に記述した大強度パルスミュオンビームを用いた方法であればこの問題が解決できる、という本業績の意義を明らかにしている。

第2章は、ミュオニウムの超微細構造測定から引き出せる物理について議論している。まず素粒子物理の標準理論の枠組みで、ミュオニウム基底状態の超微細構造の状態を計算し、実験的に測定可能な信号を説明を示している。さらに、標準理論を超えて拡張された物理模型を考えた際、想定される新粒子が実験結果に与える影響を議論している。

第3章は、実験セットアップの概要を述べている。この実験に特徴的で新しい、大強度ミュオンビームを生成する加速器とビームラインの詳細を述べ、次にミュオニウムを生成し、超微細構造を測定するために必要な実験装置と、データ収集システムについて説明している。

第4章は、実験セットアップを記述したシミュレーションコードを使って、予想される実験結果を述べている。ミュオンビームのプロファイル、ビームに伴う陽電子バックグラウンドの混入割合、標的ガス中でのミュオニウム生成空間分布、キャビティー内のマイクロ波強度、ミュオニウムスピンフリップ信号の時間分布、ミュオンが崩壊して得られる陽電子信号の時間分布、そして最終結果となる共鳴曲線、等、予想される実験結果が示されている。さらに、各種系統誤差要因が最終結果に与える影響についての議論も示されている。具体的には、ミュオニウム生成空間における残留磁場の影響、ミュオニウムと標的ガスの衝突があたえる影響、イベントが同時に発生して時間的な重なりがある時に最終結果に与える影響が評価されている。

第5章は、新たに開発したミュオン検出システムを記述している。キャビティー入り口付近におけるビームプロファイルを測定する2次元モニターの詳細、製作方法、性能が示されている。また、キャビティー内でのミュオンの3次元分布を測定する、円型シンチレーターとイメージ・インテンシファイア、CCDカメラを用いたセットアップについて述べ、実際に測定したミュオンビームの中心位置と広がりを示している。

第6章は、新たに開発した陽電子検出器システムを記述している。半導体ベースの光検出器を回路基板上に2次元的に並べたもので、信号増幅、閾値比較、TDC情報の読み出しなど一連の信号処理をおこなう電子回路を含めて、今回、開発した具体的内容が示されている。時間分解能について性能評価、複数のイベントが狭い時間差でおこった時の分離能力について、定量的評価がなされている。

第7章は、本実験セットアップ、データ取得の手順がまとめられており、第8章で、データの解析方法と最終結果を得るまでに必要な実験結果が示されている。ビームプロファイル、陽電子信号の時間分布をデータとシミュレーションとで比較しながら結果を示し、また、ミュオニウムのスピントリップ信号の時間依存性を示している。

第9章は、最終結果となる共鳴曲線を示し、超微細構造に関する最終結果を示すとともに、系統誤差に関する議論をおこなっている。残留磁場、マイクロ波の強度ゆらぎ、ミュオンビーム強度・分布のゆらぎ、標的ガス圧のゆらぎ、事象の同時発生、これらの系統誤差要因について、最終結果に与える影響を逐一、定量的に評価している。また、検出器に対する簡単な改良をおこなうことで、同じビームラインを使って測定精度を10倍以上向上させられることの見込み、さらには新たに開発中の大強度ミュオンビームラインを用いて、飛躍的に測定精度を向上させられる展望を述べている。

第10章は、最終的な測定結果と、パルス構造を持った大強度ミュオンビームを使った精密測定物理を開拓した意義を結論として述べている。

今回の、ミュオニウムの超微細構造の測定精度そのものは過去の実験を上回るものではないが、既存の連続したミュオンビームを用いた方法ではこれ以上の測定精度向上を望めないという本質的困難を解決する、大強度パルスミュオンビームを用いた実験手法を提案し、実証している。新たな実験手法を開拓する重要な業績であると評価する。

また、本論文はMuSEUM実験グループとの共同研究による成果であるが、論文提出者が主体的に検出器の製作、データ収集、解析を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であることは明らかである。

これらの結果、論文提出者は、物理学特に素粒子物理学について博士（理学）の学位を受けるにふさわしい十分な学識をもつものと認め、審査委員全員により合格と判定した。