

審査の結果の要旨

論文提出者氏名： 上野 恭裕

素粒子物理学実験は素粒子の持つ基本的な性質や素粒子間に働く相互作用を精密に調べることによって、自然界における根本的な法則を解き明かそうとする研究分野である。素粒子を含む原子の精密分光は、素粒子の基本的な性質を原子物理の手法を応用して精密に測定するための手法として、大規模・長期化が進む大型加速器実験と相補的な役割を果たすものであり、改めて注目されている。論文提出者は修士課程在籍時からミュオンと電子からなる水素様原子であるミュオニウム原子の基底状態の超微細構造を分光測定しようとする **MuSEUM** 共同研究に参加し、この論文において、極めて小さい外部磁場下で超微細構造を精密に分光するための測定装置を製作し、**J-PARC** 研究所の物質生命科学研究施設 (**MLF**) で測定を行った成果をまとめた。

本論文は6章と付録からなり、第1章は序論、第2章はミュオニウム原子の分光に関する理論と実験手法の概説、第3章は製作した実験装置の説明にあてられている。第4章では収集した実験データの解析手法が説明され、つづく第5章において解析結果と測定にともなう系統的不確かさに関して議論がなされたあと、第6章で全体のまとめをしている。

論文審査では、まず第1章と第2章で述べられているミュオニウム原子の分光の意義とその理論的な考察について説明がされたのち、先行研究となるロスアラモス研究所における測定と **MuSEUM** 共同研究の過去の成果について説明がなされた。ガス中に生成されるミュオニウム原子の超微細構造の測定においてはミュオニウム原子とガス原子との衝突による周波数シフトが大きな系統的不確かさの要因であり、できるだけ低い複数のガス圧下で測定を行うことの重要性が指摘された。

続いて第3章の内容として、新たに設計・製作された測定装置とその基本性能について述べられ、特に、**RF** キャビティについて、高次の励起モードの利用によるキャビティの大型化を図り、ロスアラモスにおける先行研究では 1.7 気圧、**MuSEUM** 共同研究が行った過去の測定では 1.0 気圧のガス圧が測定の下限だったところ、0.3 気圧まで下げた状態での測定が可能となったことが報告された。また、測定が行われる **J-PARC** で得られるパルス状のミュオンビームの時間構造を利用し、**RF** をミュオンが入射する前後にのみ印加することによってキャビティの温度変化を抑制し、キャビティの特性変化に伴う系統的な不確かさを小さくすることに成功したことが報告された。また、モンテカルロシミュレーションと独自に開発したビームプロファイルモニタを用いた測定結果を照合した上で、入射されたミュオンのうち、**RF** キャビティの内部で止まり有効な信号として活用される割合が これまで **MuSEUM** 共同研究で用いていた装置と比較して3倍程度にまで向上したことが報告された。これらの開発成果は世界最高精度でのミュオニウム原子の分光を行う上で重要なステップであると評価された。

次に、第4章に記述されている2018年6月に行われた0.3気圧と0.4気圧のガス圧下での測定データの解析手法と結果が議論された。解析にあたって用いられたシンチレータアレイのヒットパターンをクラスタ化し、1つの陽電子が複数のヒット信号を与えることによる重複カウントを排除する手法、2層のアレイのヒットパターンと時間情報を用いて真の陽電子ヒットとバックグラウンドを分別する手法などが説明された。これらの手法は高セグメント化された検出器を用いる時の標準的な手法ではあるが、世界最高のビーム強度を持つJ-PARCにおける実験ではヒット数が多く、単純なアルゴリズムでは解析に要する時間がデータ取得に要する時間を大きく上回るようになってしまう。装置のジオメトリ等を考慮した上で、当該実験に最適化された形のアルゴリズムを実装したことが評価された。こうした解析を経て、RF印加時と無印加時とのカウントレートの比がRF印加時間の関数としてプロットされ、この中で変化が大きい部分を切り出して求められた変化量を印加したRF周波数の関数としてプロットした上で、そのピーク位置としてガス中の超微細構造の値が求められた。最終的には0.3気圧、0.4気圧での値と、MuSEUM共同研究が過去に測定した1.0気圧での値を合わせて外挿することによって真空中での超微細構造の値を求めることに成功した。これは極小磁場下におけるミュオニウム原子の超微細構造の測定としては、先行研究となるロスアラモス研究所における測定からほぼ40年ぶりの測定となるものである。データの解析と並行して、系統的不確かさについても綿密な検討が行われ、現在のセットアップではガスの圧力計の精度、印加するRFパワーと周波数の変動が主たる要因となっているものの、その大きさは目標とする世界記録の更新には十分な程度にまで抑制されていることが示された。

以上のように、本研究はミュオニウム原子の超微細構造分光をJ-PARCにおいて行い、そのデータの解析手法を確立するとともに、その系統的不確かさを綿密に評価したものである。残念ながら昨年6月のビームタイムの日数が限られていたこともあり世界記録の更新にはわずかに至らなかったものの、十分な測定時間が与えられれば世界記録を更新できることが確実であることを示すことができたことは高く評価される。もとより本研究は10数名の共同研究者を含む共同研究であるが、論文提出者はその中心メンバーとして、本論文に記述された実験装置の設計・製作や実験データの解析について主導的な役割を果たしたと認められる。

したがって、本審査委員会は博士(学術)の学位を授与するにふさわしいものと認定する。