

## 論文審査結果の要旨

論文提出者氏名 永 田 祐 吾

本論文は、第 1 章序論、第 2 章超低速反陽子ビーム、第 3 章実験装置 I、第 4 章実験装置 II、第 5 章実験結果、第 6 章結論、及び、付録からなっている。本論文の学位請求は大きくわけて 3 つの要件からなっている。その第 1 は、トラップ内での反陽子雲の動径方向圧縮に成功し、それによって高い効率で超低速の直流反陽子ビームを生成したことで、第 2 章がこれに当てられている。そのようにして得た 250eV の超低速反陽子ビームと高密度ガスジェットとの衝突を行う実験装置の開発を詳細に論じたのが第 3 章で、第 2 の要件である。第 4 章では、後段加速により数 keV から数 10keV までの反陽子ビームとする方法と、計測方法を論じている。第 5 章はそれぞれのエネルギー領域における実験結果のまとめと理論との比較が行われており、これが第 3 の要件となっている。第 6 章は結論と今後の展望となっている。

反陽子は原子核反応  $p+p \rightarrow \bar{p}+p+p+p$  により生成され、実験室系では必然的に数 GeV のエネルギーを持っている。本研究では、先ず多段階の減速冷却過程により、数 GeV のエネルギーを持っていた反陽子を数 meV 程度まで 10 数桁にわたって冷却し、その後これを再加速して数百 eV から数 10keV の上質な単色ビームを得ている。これは反水素の大量生成を通じてなされる高精度の CPT 対称性テストや反物質における重力相互作用研究など、基礎物理学研究に必須であるばかりでなく、本論文の主要研究テーマである“重い電子”による原子のイオン化過程研究など、原子衝突ダイナミックスの基礎研究にも不可欠の重要な技術開発項目である。ところで、重粒子による原子の励起、イオン化、さらには阻止能等の研究は、Bohr 以来数十年の歴史をもっており、また、放射線効果をミクロに理解する上での必須の研究といえるが、いまだに十分な理解に達しているとは言えない。特に、低エネルギー領域における重粒子と原子の衝突では、通常、正電荷を持った粒子による研究しかなされていない。しかしながら、正電荷を持った粒子では、低エネルギー領域において電荷移行反応が支配的となるため、励起、電離といった現象を実験的に研究することが極めて困難となっている。低速反陽子ビームはこの問題を解決できる極めてユニークなビームである。これまで、反陽子ビームによるイオン化研究は、数 10MeV から数 10keV にわたって実験結果が公表されている。数 10MeV から数 MeV にかけての反陽子による一電子イオン化断面積は、同じエネルギー領域の陽子によるそれとほぼ一致し、ボルン近似による現象の記述が有効であることが知られていた。一方、数 10keV 領域における実験データは信頼性の高い理論予測とは大き

く乖離しており、大きな謎となっている。さらに、数keV及びそれより低いエネルギー領域では実験データは皆無で、理論計算も簡単なものを除いてほとんど存在していない。

本研究では、数10keVから数keVの単色反陽子ビームとヘリウム原子の衝突実験を行い、これまで公表されていた実験結果とは大きく異なり、かつ、最近の理論計算の結果と誤差の範囲内で大変良い一致を示すことを明らかにした。20年近く続いた論争に一定の決着をつけた研究として、高く評価できる。学位請求者はさらに、数百eVというこれまでに例のない低エネルギー単色反陽子ビームを用いて原子衝突実験を実現し、He原子のイオン化断面積を評価した。これは、イオン化に伴って放出される電子とイオン化を起こした反陽子の同時計測によって実現されたが、反陽子の検出は、必然的にその消滅を伴い、その際、GeVオーダーのエネルギーと大量の2次電子を放出する。これは実際のイオン化シグナルより数桁大きなバックグラウンドノイズを生じ、意味のある計測を極めて困難なものとする。実際、このバックグラウンドがどのようなエネルギー・時間領域に現れるかはこれまで全く知られておらず、従ってまた、各種検出器の応答も未知であったが、学位請求者はこの巨大なバックグラウンドの性質を逐次明らかにし、適切に除去するスキームを開発して、最終的にイオン化断面積を決定することに成功している。

以上、本申請者は、トラップ中に蓄積された反陽子の動径圧縮に成功し、これによって、超低速の“大強度”反陽子ビーム生成を実現した。さらに、この超低速反陽子ビームを用い、数百 eV 及び数 keV から数 10keV の反陽子ビームによるヘリウム原子のイオン化断面積決定に成功し、数 10keV 領域ではこれまでの懸案であった実験と理論が大きく乖離している問題を解決し、さらに、数 keV、及び、数百 eV での衝突実験という未踏のエネルギー領域における実験を実現し、イオン化断面積を評価した。これにより反陽子とヘリウム原子の衝突イオン化の様子が従来より2桁近く広いエネルギー領域にわたって得られたことになる。衝突ダイナミクスの理解に大きな貢献をしたと結論できる。本研究は10数名の共同研究者と共に進められた中規模のグループによる共同研究であるが、実験装置の立ち上げ、実験の遂行、その後のデータ解析等、本要旨に記載された研究内容については本申請者が主体的に進めたものである。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。