

論文審査の結果の要旨

論文提出者氏名： 田島 美典

現代の物理学が抱える最大の謎の一つに、なぜ宇宙には反粒子からなる反物質がほとんど存在しないのか、というものがある。素粒子物理学の基本的な対称性である CPT 対称性によれば粒子と反粒子はまったく同等であり、同じ性質を持つ。ビッグバンから現在までの宇宙の進化の過程で如何にして反粒子がほとんど存在しない宇宙に至ったのか、未だに結論は出ていない。本研究において論文提出者は CPT 対称性を高い精度で検証する、つまり、粒子と反粒子の性質は本当に同等であるのかを確かめるための方法として提案されてきた反水素原子の基底状態の超微細構造分光を行うための実験手法に新たな改良を加え、高いレートで低い励起状態にある反水素原子を生成することに成功し、その成果を論文にまとめた。

本論文の主要部分は 2 部構成になっており、第 1 章において序論として研究の背景と分光実験の原理が記述されたのち、第 2 章で従来手法における反水素生成実験の成果と課題がまとめられ、第 3 章で実験装置の新たな改良と、生成された反水素原子の数、ならびに主量子数の測定実験の結果、そしてさらに高いレートでの反水素生成を実現するための新しい陽電子と反陽子の混合手法の提案を行い、最後に第 4 章で全体のまとめを行っている。

論文審査では、まず、第 2 章に記述された、従来手法における反水素生成実験についての説明が行われた。反陽子と陽電子を混合するための多重リング電極を用いたネステッドトラップ、反水素原子をビームとして取り出すためのカस्प磁場、フィールドイオン化や対消滅信号の検出による反水素原子の検出法などが詳細に説明されたのち、反水素原子をトラップ内で生成し、外部に引き出すことに成功したことを報告した。反水素をトラップの外に引き出して検出したのは世界で最初の試みであり、その成功は高く評価される。また、このとき、反水素原子の生成レートは反陽子と陽電子が混合されてから比較的ゆっくりと 20 秒程度かけて上昇してピークに達した後、低下し、50 秒後にはほとんど生成が止まってしまうことが報告された。報告者はこのゆっくりとしたレートの立ち上がりの理由を考察し、混合時の反陽子のエネルギー幅が広がっていると考えると説明できることを示した。また、ピークの後には低下していく理由は、反陽子がエネルギーを失いネステッドトラップの両脇に落ち込んでしまうことによることを示し、ラジオ波を照射して反陽子を温めることで再びレートを上昇させることができることを示した。

続いて、第 3 章においては、まず、前章で論文提出者が指摘した反陽子のエネルギー幅がりを小さくするための新しい輸送ラインの設計と製作、性能評価についての説明が行われた。改善された反陽子ビームの引き出しに同期したパルスコイルを用いたビームラインを用いることにより、エネルギー幅をおよそ 0.3 eV と従来の 1/100 程度にまで小さくすることに成功したことが報告された。さらに、陽電子の温度上昇が抑えられた結果、混合直後の反水素の生成レートは従来の 100 倍にまで上昇したことが報告された。この成果は分光実験における

S/N 比を大きく向上させるものである。また、論文提出者は引き出された反水素原子の主量子数の分布をフィールドイオン化法によって測定し、主量子数が 14 以下という低励起状態の反水素原子をトラップの外で初めて観測することに成功した。実際の反水素分光に用いられる実験装置においては、これらの反水素原子は基底状態にまで落ち込むことが計算によって示されており、こうした成果は反水素原子のビーム法による分光実験が現実的に可能であることを示したものとして高く評価される。

しかし、論文提出者は、同時に、実現された高い生成レートは長続きせず、混合から 10 秒程度でレートがほとんどゼロにまで落ちてしまい、生成される反水素の数は従来と比較して 2 倍程度にしかならないこと、陽電子数を増やしても反水素の生成数は増加せず、むしろ低下してしまうことも併せて報告した。これらの予想外の振る舞いについて、論文提出者は、前者については反陽子と陽電子との散乱による急速な冷却、後者については陽電子雲の自己場によるポテンシャルの変化によって説明しうることを見出し、これらの問題を回避する新しい混合スキームを提案した。新しいスキームによって反水素の総収量は現在の 10 倍以上に上昇することが期待され、研究グループが目標としている ppm レベルでの分光に必要な反水素原子の数を確保することが可能となる。

以上のように、本研究は、ASACUSA 共同研究が追い求めてきた反水素原子の基底状態の超微細構造分光に向けての最後のピースを埋めるものであり、その内容は高く評価される。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製作・設計、性能評価、ならびに反水素原子の合成と、その主量子数測定に主導的な役割を果たしたと認められる。

最後に、論文内容の公表についてであるが、第 2 章に記述された従来の手法による反水素合成と引き出しについては、*Nature Communication* 5, 3089 (2014) に印刷公表されており、また、第 3 章に記述された新しい反陽子輸送ビームラインについては、*JPS Conference Proceedings* に投稿済、反水素原子の生成率と主量子数分布については現在投稿準備中である。

したがって、本論文は博士（学術）の学位請求論文として合格と認められる。