

論文審査の結果の要旨

氏名 船越 亮

CERN において 1999 年に稼動開始した反陽子減速器 AD(Antiproton Decelerator)では ATHENA, ATRAP, ASACUSA の 3 つの国際共同実験が行われている。そのうち、ATHENA, ATRAP の 2 グループはトラップ内で反水素原子を多量に生成し、精密分光することにより物理学の基本対称性のひとつである CPT 対称性の精密検証を目指しており、2002 年にはまず ATHENA が、次いで ATRAP が大量の反水素生成に成功した。

論文提出者は、ATHENA グループに属し、反水素生成実験に貢献するとともに、将来の反水素レーザー分光に必要な基底状態の反水素生成率を高めるため、反陽子と衝突させる陽電子プラズマの形状・密度等の諸元を効率よく制御する手法の開発において中心的な役割を果たした。

本論文は、5 章から成り、第 1 章には序論、第 2 章には ATHENA 実験の概要、第 3 章には低速反水素原子の生成、第 4 章には学位申請者が主要な寄与をしたプラズマ制御技術を用いた実験、第 5 章にはまとめが述べられている。

ATHENA 共同実験では、反陽子と陽電子をそれぞれ電磁トラップに捕捉／蓄積し、別のトラップ内で両者を混合する。AD により周期 85 秒のパルスとして供給される $\sim 10^7$ 個の 5.3 MeV 反陽子を Al 減速板で keV 程度に減速して、強磁場と静電場を用いたトラップで 10^4 個程度を捕捉し、3T の磁場中でシンクロトロン放射により環境温度である 15K に冷えた電子プラズマによって冷却した。一方、1.4 GBq の ^{22}Na 線源からの陽電子を N_2 ガスバッファ法により 300 秒で 10^8 個をトラップ中に蓄積した。これらを電位が山-谷-山をなす入れ子トラップ中で混ぜ合わせる。すなわち、中央の谷の部分に 10^8 個の陽電子を置き、 10^4 個の反陽子を 2 つの山の間を往復させ、途中の陽電子と衝突させた。

反水素原子が生成されると、電磁トラップから脱し、まわりの電極に衝突して消滅する。このとき、反陽子と核子との対消滅では数個の荷電および中性パイ粒子が放出され、陽電子と電子の対消滅では、2 つの 511keV のガンマ線が逆向きに放出される。ATHENA の検出系は巧緻で、入れ子トラップのまわりを複数粒子の 2 次元位置を検出する 2 重の Si 検出器と、ガンマ線を検出する CsI 結晶 12 (軸方向) \times 16 (方位角方向) = 192 個が取り囲んでいる。2 重の Si 検出器の位置情報からパイ粒子の軌道が定まり、複数のパイ粒子軌道の交点として反陽子消滅位置が求められる。この位置と 2 つの 511keV ガンマ線の検出位置がなす角の分布は、 180° に鋭いピークを持ち、陽電子も反陽子と同じ位置で消滅したこと、すなわち、反水素が消滅した (生成されていた) ことが確認された。

反水素原子の生成過程としては、余った結合エネルギーを光放出で捨てる放射性再結合過程と第3の粒子（ここでは陽電子）が持ち去る3体衝突過程が考えられるが、その反応率は、 n , T を陽電子の密度、温度として、それぞれ、 $nT^{-1/2}$, $n^2T^{-9/2}$ に比例する。また、これらの過程で生成される反水素の主量子数分布は、放射性過程では10程度以下が主で、3体過程では Rydberg 状態が主となる。次のステップである反水素原子のレーザー精密分光では基底状態の反水素原子が対象であり、効率よくこれを生成することが必要である。

論文提出者は電磁トラップ中の非中性プラズマに軸のまわりに回転する電場を加えることによってプラズマを制御（圧縮・膨張）できることに注目し、これを、陽電子プラズマに適用し、2つの反水素生成過程の密度依存性の違いを利用して、それらの寄与比率を制御する可能性を追究した。この手続きを一連の反水素生成サイクルに収めるため、これまでは100秒程度を要していた制御時間を条件の最適化により26秒にまで短縮した。さらに、この手法により用意された 8×10^9 , 7×10^8 , $1.5 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$ の3種類の密度の陽電子プラズマでの反水素生成の時間スペクトルに生成機構の寄与の違いを反映したと考えられる差異を見出した。これは、生成される反水素原子の励起状態分布を制御する技術開発の手掛かりを得たものであり反水素のレーザー精密分光実現への重要なステップと考えられる。

本論文は ATHENA 共同実験という多人数の共同研究の成果であるが、論文提出者は世界初の冷反水素生成実験全般に貢献するとともに、第4章に詳述されている陽電子プラズマを効率よく制御する手法の開発とその実地への適用において中心的な役割を果たした。よって、論文提出者の寄与は十分であると判断する。

したがって、本審査委員会は博士（理学）の学位を授与できると認める。