

# 論文審査の結果の要旨

氏名 坂口 淳

本論文では反陽子 ( $\bar{p}$ ) が He 原子軌道に捕獲されて形成される反陽子ヘリウム原子 ( $\bar{p}\text{He}^+$ ) の準安定状態についてマイクロ波を用いた高精度の分光を行い、電子、ヘリウム原子核、反陽子が形成する三体系の最新理論の結果が検証されている。第1章では研究に至った背景と研究目的、第2章では  $\bar{p}\text{He}$  原子とマイクロ波分光のレビュー、第3章はレーザー・マイクロ波・レーザーの3重共鳴法、第4章はデータ解析、第5章ではまとめ、の順に記述している。

$\bar{p}\text{He}$  原子の準安定状態は 1991 年日本のグループによって発見された。 $\bar{p}$  が He ガス中に止められると  $\bar{p}$  は He の 1s 軌道電子の代わりに高励起準位に捉えられ、カスケード的に脱励起する。このとき  $\bar{p}$  の大部分は He 原子の残りの電子もオージェ過程により放出し、ピコ秒程度の速さで He 原子核の核子と対消滅する。しかし全体の約 3% の割合でオージェ遷移を起こさず、残った電子とヘリウム原子核の系に高軌道角運動量を持った状態で束縛される寿命がマイクロ秒領域の準安定状態が実現する。同グループは  $\bar{p}\text{He}$  の精密分光のため ヨーロッパ連合原子核研究機関 (CERN) の  $\bar{p}$  ビームを用いた研究を開始し、1994 年にこの準安定状態のカスケード的な電磁遷移についてレーザー共鳴に成功した。その後  $\bar{p}$  準位の主量子数 ( $n$ ) と軌道角運動量 ( $l$ ) の  $(n, l) = (37, 35)$  から  $(38, 34)$  への共鳴について 1.7 GHz 差のダブルット状態を観測した。この構造は  $\bar{p}$  の軌道角運動量と電子スピンの結合して作られる超微細相互作用 (HFI) によるものと解釈された。一方この  $\bar{p}$  の関わるヘリウム原子の三体系は理論にとっても挑戦に値するエキゾチックな系として量子電磁気学 (QED) に基づくいくつかの計算がなされた。そこではこの軌道角運動量と電子スピンの結合した状態がさらに  $\bar{p}$  スピンの向きによってエネルギー的に分離する極超微細相互作用 (SHFI) が計算されている。

本論文ではこの HFI と SHFI に着目し、このマイクロ波共鳴に世界に先駆けて成功したことを論じている。この中でこのマイクロ

波共鳴を行うに際してキーとなる以下の実験技術が開発された。

- (1)  $\bar{p}$  を効率良く He 気体中に止めかつマイクロ波共鳴が行える共振器の設計と製作、
- (2) マイクロ波共鳴の周波数掃引を行うに際し高いQ値を保ったまま周波数変更が行うことのできる回路の設計と製作、
- (3) マイクロ波共鳴条件を判定する 150 ナノ秒近い時間差を有するレーザーの二重パルス光の用意。

当論文ではこのマイクロ波分光法により 2001 年 8 月に行われた延べ 7 日の実験について、各日ごとに得られたマイクロ波共鳴データを元にマイクロ波共鳴周波数の同定を行った。この中には実験的に最適条件として得たマイクロ波出力値 24W を 1/3 の出力にした場合の効果、He ガス圧の影響をみるために大部分の測定を行ったガス圧 250 mbar を 540 mbar としたときの効果、等の結果も論じられている。

以上の結果は  $(n, l) = (38, 34)$  から  $(37, 35)$  へのレーザー遷移  $v_{\text{HF}+}$  と  $v_{\text{HF}-}$  の値にまとめられ、Kino-Yamanaka, Korobov-Bakalov の理論計算と比較検討されている。理論は QED 計算の  $\alpha$  の 2 乗の精度となっており数値としては約  $5 \times 10^{-5}$  の精度となっているが、実験値はこの範囲ではほぼ一致している。ただし  $v_{\text{HF}+}$  の実験値は理論値精度の倍程度のばらつきを示す。すなわち現時点では理論が  $\bar{p}$  の磁気モーメントを陽子のものに等しくとっている仮定の適否を判断することはできない。またガス圧力への依存性は明解ではないが僅かの依存性があることを否定できることにはなっていない。しかし本論文は  $\bar{p}\text{He}$  系のマイクロ波共鳴に初めて成功し、今後の精密分光研究の先端を拓いた上、現在最も精度の高い理論計算をほぼ検証することができている。

本論文 4 章および 5 章は CERN の反陽子減速器 (AD) での実験メンバーとの共同研究であるが、論文提出者は、上記の実験技術の開発 (2) を中心とする実験遂行上の寄与を含め、データ解析の大部分を行うなど十分な貢献をしたと判断される。

したがって博士 (理学) の学位を授与できると認める。