

論文審査の結果の要旨

氏名 周 健治

本論文は、高速冷却を目指した多孔質材料中におけるポジトロニウムのレーザー励起に関する研究であり、5章から構成される。

第1章は、序章であり、ポジトロニウムを用いた素粒子物理研究の展開、そして高精度測定に必須となるポジトロニウムの冷却のアイデアと、冷却を実現するための課題が示されている。論文申請者は、ポジトロニウムをシリカ多孔質媒質中に閉じ込め、ポジトロニウムと媒質との衝突による熱化と、レーザーを用いた冷却（ドップラー冷却）を併用することとで、独創的な高速冷却手法を編み出した。しかし、シリカエアロジェル媒質中でのポジトロニウムの冷却に必要なレーザー共鳴波長の幅が広くなり、また、ポジトロニウムが冷却用レーザー照射により励起される 2P 状態での消滅確率が増大することが、近年、報告されており、レーザー冷却を著しく困難にするこの2つの媒質効果を、定量的に測定し、レーザー冷却実現に向けたメカニズム解明を目標としている。

第2章は、実験装置の開発に関して、述べられている。ポジトロニウムのポーズ凝縮実現には、ポジトロニウムのドブロイ波長が重なる程度の高密度で冷却された集団を生成する必要がある。実験は、高エネルギー加速器研究機構の低速陽電子実験施設 (KEK-SPF) で行われ、陽電子ビームのイオン光学を制御することで、ターゲットとなるエアロジェルの位置でフォーカスすることで、高密度ポジトロニウムの生成行なった。エアロジェル空孔中に生成したポジトロニウムに、パルスレーザーを照射し、生成された消滅 γ 線をシンチレータで検出し、その消滅率を測定する装置を開発した。

第3章では、解析手法の詳細が述べられている。KEK-SPF では、バンチ化された陽電子からの多数の消滅 γ 線が検出されるため、パイルアップを適切に処理できる解析方法を2種類開発し、解析結果の確度を高めている。一つ目の解析では、バンチごとの光電子増倍管で得られた出力波形を平均し、 γ 線強度・陽電子バンチの時間波形・検出器の応答で構成されるモデル関数をフィットすることで、パイルアップを解くことなく、ポジトロニウムの寿命等を抽出した。二つ目の解析では、ハイパスフィルターを適用してパイルアップの影響を抑制し、検出した γ 線のパルスを個別に解析し、寿命、エネルギースペクトルを得ている。

第4章は、ポジトロニウムのエアロジェル媒質中での崩壊や共鳴波長に関する媒質効果に関して、結果を示すとともに、その物理解釈等の詳細な議論を行なっている。まず、2P 状態でのポジトロニウムが空孔の外では消滅しないことを確認している。また、共鳴周波数の幅も、エアロジェル中での熱化過程により予測されるポジトロニウムの温度から生じるドップラー広がり程度であり、異常な幅の広がりがないことを確認している。そこで、空孔中での 2P 状態のポジトロニウムの解析の結果、空孔の外とは異なり、高い消滅率で崩壊することを示した。さらに共鳴幅に関して、ドップラー広がりや衝突広がりといった既知の現象では説明できない広い共鳴幅（半値全幅で 1nm 程度）を確認した。さ

らにポジトロニウムのエアロジェル空孔中での消滅率は、運動エネルギーに依存することが示され、共鳴幅は、消滅率には依存しないことが明らかになった。このことから、消滅現象とは独立な機構で、共鳴周波数の幅が広がっていることが示唆される。この考察をさらに進めて、エアロジェルの空孔表面に存在するシラノール基により発現する双極子電場により、ポジトロニウムに生じるシュタルク効果が、共鳴周波数の幅を広げる大きな要因となっていることを示した。

以上、本論文では、新物理探索の新しいプローブとなる反物質を構成要素にもつ最も単純な束縛系であるポジトロニウムを対象に、分光実験等の精度向上の鍵となる高速冷却手法を具体的に示すとともに、レーザー冷却の新しい原理を提案した。さらに、その冷却実現の課題となるポジトロニウムのエアロジェル空孔中での媒質効果を、定量的に詳細な解析を初めて行い、消滅現象と共鳴周波数の幅が広がる原理を解明した。全ての項目に関して、論文提出者が主体となって行ったものであり、ポジトロニウムの高速冷却を提案し、その問題となる事項を解明し冷却実現に向けた基盤を開拓したことは高く評価され、学位論文としての基準を十分超えていると判断される。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。