

論文審査の結果の要旨

氏名 中島 秀太

1980年代中頃からレーザーによる原子の冷却と捕獲手法の開発が爆発的に進行した。そして、この開発で得られた極低温原子系において、ボーズ-アインシュタイン凝縮を含む量子力学や統計力学の重要な基礎現象が相次いで観測されている。本論文では、 ${}^6\text{Li}$ フェルミオン原子系を舞台にフェッシュバツハ共鳴で可能になる2体相互作用可変性の特徴を利用して、エフィモフ3量体の物理が研究された。とりわけ、その3量体の観測とその束縛状態における普遍性の実験的検証が中心課題として提起された。

さて、英文で本文8章と補遺3つから成る本論文の第1章では、レーザー冷却原子系研究の歴史を振り返りつつ、フェッシュバツハ共鳴を始めとした基礎概念が解説された。また、1体や2体を越えた少数多体問題において、普遍性を有する3体のエフィモフ束縛状態の研究意義が述べられた。そして、本論文の構成に沿って各章の内容が手短かに紹介されると共に、この研究で得られた主要な成果が要約された。

次の第2、3章では、この冷却原子系を記述する従来理論がまとめられた。まず始めに、低密度系における2体相互作用は散乱の漸近領域で定義される s 波散乱長 a で完全に規定されること、フェッシュバツハ共鳴でこの a を $-\infty$ から ∞ まで可変に制御できること、そして、 $|a| \rightarrow \infty$ とすることで普遍性の概念を生み出すユニタリー系が実現可能なことが強調された。また、エフィモフ3量体の解説が中心の第3章では、近距離の散乱領域内での相互作用の詳細は散乱漸近領域での3体波動関数の振る舞いを規定する3体パラメータ Λ に集約され、この Λ と a で共鳴的な2体束縛状態の縁に存在する普遍性のあるエフィモフ3量体の物理が展開された。また、3量体形成の同定に関連して、この3量体が3原子系や原子分子(2量体)混合系へ分裂・再結合する現象のダイナミクスが論じられ、最後に、エフィモフ3量体に関する先行実験研究がまとめられた。

${}^6\text{Li}$ 原子の基底状態超微細スピンの3成分混合系を実験的に実現する手法の詳細は第4、5章で記された。用いられた実験手段は磁気光学トラップ、共振器増幅光双極子トラップ、シングル光双極子トラップなどの当該分野の最新技術を駆使したものとはいえ、本研究で革新的に開発されたものはない。ただ、周波数の安定化を目指した半導体レー

ザーベースの光源開発や3成分を同じ重みで分布させるための2色ラジオ波磁場印加をはじめとして、随所で工夫が見られた。

本論文の中心的な成果は第6、7章で報告された。まず第6章では、原子分子混合系の数減少係数 β を測定して、その混合系のエネルギーが3量体の基底状態若しくは第一励起状態のエネルギーと共鳴するところで β が極大になることを観測した。また、第7章ではこの複合系をラジオ波磁場励起して3量体を直接的に会合生成し、その3量体第一励起状態の束縛状態エネルギー E_{123} を70 nKで精密測定した。この測定結果は温度に依存し、先行研究のように1 μ Kでは決して正しい E_{123} は得られないと結論した。このため、普遍性の成立を肯定した先行研究は誤りで、もしエフィモフ3量体の物理を Λ を通して理解しようとするれば、 Λ は異常なエネルギー依存性を持つことが議論された。なお、現時点では、 β 測定時のスペクトル幅を決めている強結合分子状態への落ち込み率を記述する η の詳細が解明されておらず、そもそも、この3量体は Λ を通して全て理解できるのかという根本的な疑問も残る。

最後に第8章では、本研究で得られた新しい研究成果が要約されると同時に、上述した疑問点も含めて今後の課題が列挙された。なお、本論文の末尾には ${}^6\text{Li}$ 原子系のエネルギー準位図やその準位間の遷移制御、分子対の数減少係数に関連した補遺がつけ加えられた。

以上、各章の紹介とともに本論文で得られた物理学上の知見を解説した。 ${}^6\text{Li}$ フェルミオン冷却原子を具体例としてエフィモフ3量体における普遍性の破れを実験的に見出し、 Λ にまつわる新しい問題点を指摘したことは非常に高く評価される。これはレーザー冷却原子系における新発展に寄与するだけでなく、少数多体系における束縛状態という基礎物理学上の重要課題にも十分な貢献が認められるものである。したがって、審査員全員が学位論文として十分な水準にあり、博士(理学)の学位を授与できると認める。尚、本論文の内容は上田正仁氏、堀越宗一氏、向山敬氏、Pascal Naidon氏らとの共同研究だが、中島氏が主体となって実験及び結果の解釈を行ったものであり、中島氏の寄与が十分であると判断する。また、この件に関して、上田氏を始め4名全員から同意承諾書が提出されている。本論文の内容の一部は既にPhysical Review Letters誌で公表されている。また、残りの部分も投稿中である。