

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 稲田 安寿

物質粒子を極低温下で密度を上げていくと、個々粒子の量子統計性に支配された集団の量子現象が巨視的なスケールで発現する。クーパー対電子による超伝導現象や液体ヘリウムの超流動現象などがその実例である。これらの巨視的量子現象は、粒子間の相互作用によってその様相が変わる。近年、レーザー冷却法および蒸発冷却法によって原子気体をマイクロケルビン以下の極低温に冷却し保持する技術が開発された。またフェッシュバック共鳴により、粒子間の相互作用を自在に制御する手法も確立した。これらの手法を用いて、超高真空槽の中に中性原子を極低温状態で捕獲し、様々な条件下で多体量子効果を探査する研究が活発に進められている。本研究では、フェルミオン原子 ${}^6\text{Li}$ を対象とし、極低温下でトラップ中に保持し、量子縮退状態を実現する手法を開拓した。さらに、相互作用可変な状況のもとで、量子縮退した原子気体の挙動を系統的に観察・評価する実験手法を確立した。真空槽内の ${}^6\text{Li}$ 原子に対して、レーザー冷却法、蒸発冷却法、光シュタルク効果によるトラップ法を開拓し、フェッシュバック共鳴を利用して、二原子間に s 波散乱および p 波散乱を共鳴的に誘起し、原子間相互作用が共鳴的に増大する状況下での量子現象の探索を行った。 s 波の散乱の共鳴前後において、分子の BEC 状態と BCS 状態の推移に伴う系の状態変化を系統的に調べた。BEC 転移温度の相互作用依存性を系統的に捉えることに成功した。また、 p 波のフェッシュバック共鳴を利用して、 ${}^6\text{Li}$ 原子対の相対運動が p 波をとる分子- p 波分子-の形成観測に初めて成功し、その非弾性散乱寿命などの特徴を調べた。

本論文は以下の 8 章からなる。以下に各章の内容を要約する。

第 1 章では、本論文の序論として、多体量子現象の研究の歴史、原子気体における研究について述べ、本研究の背景を説明している。次に、本研究の目的を述べ、本論文の構成を示している。

第 2 章では本研究の理論的背景として粒子間の相互作用の記述について述べている。散乱の一般公式を説明し、本研究で主要な役割をはたす、フェッシュバック共鳴の原理と ${}^6\text{Li}$ 原子の場合の具体例について述べている。

第 3 章では、ボース粒子系の理論について、一般論と原子系の実験に即したトラップ中での振る舞いについて述べている。さらに本研究で議論する、相互作用の効果について理論的背景を説明している。

第 4 章では、フェルミ粒子系の理論的背景を概観している。BCS 理論および BEC-BCS クロスオーバーの議論の論点を解説すると共に、フェッシュバック共鳴点における特異的な状況であるユニタリー極限での振る舞いについて述べている。

第5章では、本研究で開発した実験装置について述べている。真空装置、レーザー装置、磁場制御について述べた後、原子気体のレーザー冷却、光トラップ法、共振器による光トラップ、レーザービームによる捕獲、トラップの評価法、スピン偏極の制御法、極低温化のための蒸発冷却の詳細について解説している。

第6章では、本研究の第一課題である s 波相互作用するフェルミオン原子の研究について実験の詳細と結果の考察について述べている。相互作用が強く働く領域において、原子系の相図を正しく決定するための手法を開発し、BEC状態からBCS状態へ推移する振る舞いについて新たな知見が得られたことが述べられている。

第7章では、本研究のもう一つの課題である p 波相互作用するフェルミオン原子系の研究について述べている。本研究ではじめて⁶Liのp波分子生成が確認され、その性質が明らかになったことが述べられ、p波分子のBEC実現に向けた方策について議論されている。

第8章では、本研究の結果をまとめると同時に、課題と今後の展望について述べている。

この他、本論文を理解する上で参考となる知識や計算の詳細について、付録A、Bを設けて説明している。

以上のように本研究は、レーザー技術を駆使して、フェルミオンリチウム原子を極低温下でトラップ中に捕獲し、その相互作用を系統的に変化させることで生じるフェルミオン対によるBECやBCS状態の超流動現象に対して、相互作用をパラメータとして系統的に探索する実験手法を確立し、多体量子現象について新たな知見を得たものである。この知見は、応用上重要な超伝導現象に関連する多体量子現象の理解を深めるものであり、意義は大きい。また、本研究で開拓された、レーザー分光やレーザー制御技術は、光科学技術の展開という意味でも重要な技術を多く含んでいる。尚、本研究はグループ研究のもとで行われたものであるが、上記の研究について、論文提出者が主導的な寄与をしていることは論文に明記され、かつ審査においても明確に確認された。これら本研究の成果は今後の物理工学の発展に大きく寄与することが期待される。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。