

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 加藤 宏平

冷却原子実験の進展を支える技術のひとつに、フェッシュバッハ共鳴がある。フェッシュバッハ共鳴を利用すると原子間の相互作用の制御が可能になるだけでなく、極端に束縛エネルギーの小さい分子（フェッシュバッハ分子）を作ることにもできる。本論文では 41 カリウム(41K) と 87 ルビジウム(87Rb)の混合気体を用いて、異なる原子種からなるフェッシュバッハ分子を作成し、その性質を調べた実験的研究をまとめたものである。

フェッシュバッハ共鳴近傍のような原子間の 2 体の相互作用が共鳴状態にあるところでは、エフィモフ状態と呼ばれる、束縛エネルギーが等比級数をなす、無限個の 3 体束縛状態が出現することが知られている。エフィモフ状態は 3 個の原子間の非弾性散乱レート、および原子とフェッシュバッハ分子間の非弾性散乱レートに大きな影響を与えるため、その理解は非常に重要である。特にフェッシュバッハ共鳴によって散乱長を制御すると、エフィモフ状態は上記の非弾性散乱レートを共鳴的に変調する。

近年の等核原子の 3 体の非弾性散乱レートの測定によって、上記のエフィモフ状態による共鳴を与える散乱長の値が、原子核間ポテンシャルの詳細によらず、ファンデルワールス相互作用のみによって決定されているという事が見出された。この一見意外な結果について理論解析が進められ、現在では理論と実験の一致が見られている。しかし異核原子の系については、エフィモフ状態の存在自体は確認されているものの、実験例が極めて少なく、またあっても理論との大きな乖離が見られる。本論文は 41K-87Rb 混合系を用いて、異核のエフィモフ状態に関して新しい知見を得ることを目標としている。

本論文の第一の成果は、ボソン混合系における、3 体ロス係数の精密な測定方法の開発である。ボソン混合系では複数の 3 体衝突のチャンネルがあるため、それらを分離するためには通常の 3 体ロス係数の測定よりもさらに高い S/N が求められる。本論文ではこの問題を非破壊イメージングの導入によって解決している。同一の気体の各原子数の時間発展を直接観測することで、測定における初期原子数のゆらぎの影響が取り除かれ、高い S/N を実現している。その結果、3 体ロス係数で判断する限り、41K-87Rb 混合系の複数のフェッシュバッハ共鳴間の比較において、また 41K-87Rb 混合系のフェッシュバッハ共鳴と 40K-87Rb 混合系のフェッシュバッハ共鳴の比較において、大きな違いは見られないことが分かった。この結果は理論的予想と一致している。

本研究のもう一つの成果は、原子とフェッシュバッハ分子間の 2 体の非弾性散乱レートにおけるエフィモフ共鳴の観測である。共鳴が起こる散乱長において、フェッシュバッハ分子の束

縛エネルギーが、エフィモフ状態の3体の束縛エネルギーと一致すると考えられるため、この共鳴の観測はエフィモフ状態の束縛エネルギーを一意に決定する重要な測定である。ロスを感じ度よく観測するためには十分な数のフェッシュバッハ分子を用意することが必要になるが、本論文では、3次元光格子中でフェッシュバッハ分子を作成することでこの問題を解決している。測定された原子・フェッシュバッハ分子のロス係数の共鳴を示す散乱長( $a^*$ )はカリウムの同位体を用いた別の研究室の測定とわずかな差が見られた。この差の起源はフェッシュバッハ共鳴の性質の違いに起因すると考えられるため、異核原子のエフィモフ状態の理解においても、フェッシュバッハ共鳴のパラメーターを取り入れた理論を構築する必要を示していると考えられる。

本論文は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、極低温原子、および分子の分野の概観を述べている。

第2章では原子間相互作用の理論について述べている。特に実験の中心的テーマであるフェッシュバッハ共鳴とエフィモフ状態の理論的扱いを述べている。

第3章では極低温のボース混合気体の振る舞いについて述べている。2原子種で問題となる相互作用と安定性の関係についても述べている。

第4章では混合気体の実験に用いた実験装置の概要について述べている。87Rb と 41K の協同冷却、および2つのボース凝縮体の重ね合わせの方法など、2原子種の実験に特有な手順についても詳しく述べている。

第5章ではフェッシュバッハ共鳴付近での3体ロスの高精度な決定の実験について述べている。非破壊イメージングの導入、解析手法、他のグループの実験との比較が述べられている。

第6章ではフェッシュバッハ分子の生成効率の向上について述べられている。2原子種の空間的重なり解析および3次元光格子の利用について述べられている。

第7章では原子とフェッシュバッハ分子の2体のロス係数におけるエフィモフ共鳴の観測について述べている。

第8章では本論文をまとめ、課題と今後の展望を述べている。

以上のように、本論文は異なる原子種間のフェッシュバッハ共鳴近傍の非弾性散乱におけるエフィモフ状態の寄与について、精密な測定を行い、同位体間での定量的比較を可能にする重要な測定結果を得ることに成功している。特に 41K-87Rb 系で観測された原子とフェッシュバッハ分子の2体ロス係数のエフィモフ共鳴は他の同位体の結果との定量的比較を可能にし、異核のエフィモフ状態の理論の精密化に資するものとして高く評価できる。

よって、本論文を博士（工学）の学位論文として合格と認める。