

学位審査報告書

(ふりがな)	きたがわまさあき
氏 名	北川 昌明
学位（専攻分野）	博 士 （ 理 学 ）
学 位 記 番 号	理 博 第 号
学 位 授 与 の 日 付	平成 年 月 日
学 位 授 与 の 要 件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻
(学位論文題目)	
高分解能光会合分光法による冷却イッテルビウム原子間相互作用の決定	
論 文 調 査 委 員	(主査) 高橋義朗 教授 松田祐司 教授 中暢子 准教授

理 学 研 究 科

(続紙 1)

京都大学	博士（物理学）	氏名	北川昌明
論文題目	高分解能光会合分光法による冷却イッテルビウム原子間相互作用の決定		
（論文内容の要旨） 近年、中性原子のレーザー冷却技術が開発され、マイクロケルビン台の極低温の原子集団を用意することが可能になり、物性、量子情報、原子時計、その他様々な研究に用いられている。これらの極低温の原子集団を用いた研究において、原子間相互作用が重要な役割を担う。対象となる原子気体は低密度なので、多くの場合、2体散乱のみを考えればよく、さらに超低温では、遠心力障壁のためにs波散乱のみが許容される。このような事情により、超低温の原子間相互作用において最も重要なパラメータは2体のs波散乱長である。 冷却原子の研究でよく用いられるアルカリ原子の場合は、s波散乱長に関する理論・実験が比較的豊富にあり、その値はよくわかっている。一方、量子シミュレーションや量子情報の研究に大変有望として近年非常に注目されているイッテルビウム原子に関しては、これまで、原子間相互作用に関するいくつかの測定があったが、その詳細は明らかになっていなかった。本論文は、光会合分光法を用いて電子基底状態におけるイッテルビウム散乱波動関数を高精度に決定するとともに、高分解能2光子光会合法を用いて、電子基底状態におけるイッテルビウム分子の束縛エネルギーを高精度に測定し、その値を用いてイッテルビウム原子のs波散乱長を高精度に決定した研究について報告したものである。 本研究では、高温の原子オーブンから出てきたイッテルビウム原子を、レーザー冷却法によりまず数10マイクロケルビンまで冷却し、その後、光によるトラップ中で蒸発冷却と呼ばれる原子間衝突を用いた冷却法により1マイクロケルビンまで冷却した。この超低温のイッテルビウム原子集団に、スピナー重項間の電気双極子許容の遷移やスピン禁制遷移について、光会合分光を行なって、s波散乱長に関する情報を得ることに成功している。光会合とは、2つの自由な原子の状態に、特定の波長を持った光を入射することにより、特定の振動・回転状態にある分子の束縛状態を生成することである。この特定の波長の情報から分子の束縛エネルギーを決定することができる。実験では、光会合用レーザーを入射したことによる原子数のロスを測定することにより、光会合スペクトルを得ている。 まず、スピナー重項間遷移を用いて多くの光会合共鳴を測定しその光会合レートの周波数依存性を詳細に測定し、そこから基底状態原子間の散乱波動関数を再現することに成功した。これは、光会合レートが基底状態原子間の散乱波動関数の絶対値の自乗に比例することを利用している。これにより、イッテルビウム174同位体の散乱長を5.53nmと正確に決定することに成功した。さらに、スピン禁制遷移を用いた高分解能光会合分光を行い、6つの同位体のイッテルビウム原子について2光子光会合分光を行い、12の束縛状態の結合エネルギーを決定した。特に、分光に用いた光による共鳴のシフトや有限温度による共鳴のシフトを補正することにより、非常に高精度に結合エネルギーを決定することに成功した。この結果を用いて、同位体によらない原子間断熱ポテンシャルをもとにした理論的考察を行うことにより、7種の全ての同位体間および21組の異なる同位体間のs波散乱長を高精度に決定することに成功し、極低温におけるイッテルビウム原子間相互作用を明らかにした。さらに高次の部分波による散乱の振舞いも同時に明らかにした。これらは、他の原子系では考えられない大変ユニークな成果である。			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

中性原子のレーザー冷却技術が大きく発展し、マイクロケルビン台の極低温の原子集団を用意することが可能になった。これにより、物性研究、量子情報処理、高精度原子時計の開発、その他様々な研究・開発において大きな進展が見られている。これらの極低温の原子集団を用いた研究においては、原子間相互作用が重要な役割を担う。対象となる原子気体は低密度なので、多くの場合、2体散乱のみを考えればよく、さらに超低温では、遠心力障壁のためにs波散乱のみが許容される。このため超低温の原子間相互作用においては2体のs波散乱長が最も重要なパラメーターであるといえる。

冷却原子の研究でよく用いられるアルカリ原子の場合は、s波散乱長に関する理論・実験が比較的豊富にあり、その値はよくわかっている。一方、量子シミュレーションや量子情報の研究に大変有望として近年非常に注目されているイッテルビウム原子に関しては、これまで、原子間相互作用に関するいくつかの測定があったが、その詳細は明らかになっていなかった。このような背景のもと、申請者は、高分解能光会合法を用いて、電子基底状態におけるイッテルビウム散乱波動関数を高精度に決定するとともに、イッテルビウム分子の束縛エネルギーを高精度に測定し、それらの結果を用いてイッテルビウム原子のs波散乱長を高精度に決定することに成功した。

申請者は、その実験において、まず、高温の原子オープンから出てきたイッテルビウム原子を、レーザー冷却法によりまず数10マイクロケルビンまで冷却し、その後、光によるトラップ中で蒸発冷却と呼ばれる原子間衝突を用いた冷却法により1マイクロケルビンまで冷却した。この超低温のイッテルビウム原子集団に、スピン-重項間の電気双極子許容の遷移や、スピン禁制遷移を用いて、光会合分光を行なって、s波散乱長に関する情報を得ることに成功している。具体的には、申請者は実光会合用レーザーを入射したことによる原子数のロスを測定することにより、光会合スペクトルを得ている。

申請者が最初に行なった光会合分光は、スピン-重項間遷移を用いたものである。多くの光会合共鳴を測定しその光会合レートの周波数依存性を詳細に測定し、そこから基底状態原子間の散乱波動関数を再現することに成功した。これは、光会合レートが基底状態原子間の散乱波動関数の絶対値の自乗に比例することを巧みに利用したものである。これにより、イッテルビウム174同位体の散乱長を5.53nmと正確に決定することに成功した。次に申請者は、スピン禁制遷移を用いた高分解能光会合分光を行った。6つの同位体のイッテルビウム原子について2光子光会合分光を行い、その結果、12の束縛状態の結合エネルギーを決定した。特に、分光に用いた光による共鳴のシフトや有限温度による共鳴のシフトを補正することにより、非常に高精度に結合エネルギーを決定することに成功した。この結果を用いて、同位体によらない原子間断熱ポテンシャルをもとにした理論的考察を行うことにより、7種の全ての同位体間および21組の異なる同位体間のs波散乱長を高精度に決定することに成功し、極低温におけるイッテルビウム原子間相互作用を明らかにした。さらに高次の部分波による散乱の振舞いも同時に明らかにした。これらは、他の原子系では考えられない大変ユニークな成果である。

以上のように、申請者の研究によって、大変注目を集めているイッテルビウム原子の原子間相互作用が高精度に決定された。これらの研究は、世界に先駆けたもので、すでに学術雑誌や国内・国際会議などを通して、国の内外を問わず脚光を浴びている。これらの研究は、今後、光・原子・分子物理学、量子情報処理、量子エレクトロニクス、など、多くの研究分野への貢献も多大であり、高く評価できる。

よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成21年12月24日、論文内容とそれに関連した事項について口頭試問を行った。その結果、合格と認めた。

要旨公開可能日： 年 月 日以降