

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	小野 滉貴
論文題目	Two-Orbital Quantum Gases in an Optical Lattice: Interorbital Spin-Exchange Dynamics and Spin-Space Quantum Transport (光格子中の2軌道量子気体：軌道間スピン交換ダイナミクスとスピン空間量子輸送)		
(論文内容の要旨)			
<p>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。さらに、ボース・アインシュタイン凝縮体やフェルミ縮退などの量子気体が生成され、その物性研究が盛んに研究されている。さらに、量子気体を、光格子と呼ばれるレーザー光の定在波によってつくられた周期的なポテンシャルに導入した系は、固体中の電子系とのアナロジーから、強相関量子多体系を研究する新しい実験系として注目を集め、盛んに研究されている。特に、不純物や格子欠陥のない、理想的な系を対象とすることができることや、系のパラメーターを高い精度で制御可能であることが大きな特徴であり、このようなことから、光格子中の冷却原子を用いた実験は、量子多体系に対する量子シミュレーション実験と認識されている。このような背景のもと、本論文の研究では、原子種として2電子系原子であるイッテルビウム原子を用いて、そのユニークな特徴である、2つの安定な軌道状態、すなわち、基底状態1S_0と準安定状態3P_0に着目し、下記の2つの研究を行った。</p> <p>まず第1の研究では、イッテルビウムの2つあるフェルミ同位体の内、核スピン1/2を有する^{171}Yb原子に着目して研究を行った。2電子系原子に特有の基底状態1S_0と準安定状態3P_0の2つの安定軌道間のスピン交換相互作用を用いることで、物性物理学における最重要問題の1つである近藤効果について極めて自然な形での量子シミュレーションできることが期待されてきた。ただし、これまで実験の対象とされていた^{173}Yb原子や^{87}Sr原子は、強磁性的なスピン交換相互作用を示す系であることが判明しており、近藤効果の量子シミュレーションにはそのまま利用することが難しい状況であった。そこで、本論文では、新たにイッテルビウム^{171}Yb原子に着目し、そのスピン交換相互作用を、高分解能レーザー分光の手法を駆使して高い精度で決定し、近藤効果の研究に要求される、反強磁性的な相互作用であることを突き止めた。さらに、近藤効果の量子シミュレーションのための実験系として、基底状態1S_0の原子は、一次元チューブの中を自由に運動する一方で、準安定状態3P_0の原子は、3次元的に閉じ込められた、いわゆる(1+0)混合次元の系を、複数の波長の光格子を組み合わせることで実現した。超低温に冷却された^{171}Yb原子を、この2つの軌道からなる(1+0)混合次元の系に導入して、スピン交換相互作用に起因する、基底状態1S_0の原子のスピン偏極が緩和する様子を直接、光シュテルン・ゲルラッハ法により観測することに成功した。これは、冷却原子を用いた近藤効果の量子シミュレーションに向けた大きな一歩であると言える。</p> <p>第2の研究では、イッテルビウムのもう一つのフェルミ同位体である、核スピン5/2を有する^{173}Yb原子に着目して、ユニークな量子輸送の研究を行った。近年、冷却原子を用いて2端子間の量子輸送の研究が行われ、コンダクタンスの量子化などが観測されている。このように、量子シミュレーションの領域が、量子輸送の研究にまで及んできている。ただし、非常に精巧な光トラップポテンシャルを実装する実験的な困難さがあり、さらに研究を発展させるうえでのハードルとなっていた。そこで、本研究では、実空間での輸送ではなく、</p>			

スピン空間での輸送を対象とすることで、ユニークな量子輸送の研究を行うことが可能であるとする理論提案をもとに実験を行い、これを実証することに成功した。具体的には、上記の第1の研究と同様に、基底状態 1S_0 と準安定状態 3P_0 の2つの軌道に ^{173}Yb 原子を導入したうえで、さらに高磁場を印可する。この状況においては、スピン交換ダイナミクスは抑制され、スピン状態に変化はない。しかし、スピンの重ね合わせ状態を生成すると、局在原子との相互作用により、それと直交した状態へ遷移する、すなわち輸送されることを、実証することに成功した。オーミックな伝導であることを実験的に確認し、その振舞いが理論計算と良く一致することを確認した。特に、この系の大きな特徴である、大きなスピン自由度を活用して、3端子間の量子輸送の実証に成功した。これは冷却原子を用いた新しいタイプの量子輸送の実験系を開拓したことになり、大きな成果であると言える。

これらの成果は、どれも世界で初めての重要な成果であり、光格子中の冷却原子を用いた量子シミュレーション研究を大きく前進させたと言える。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

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。さらに、ボース・アインシュタイン凝縮体やフェルミ縮退などの量子気体が生成され、その物性研究が盛んに研究されている。さらに、量子気体を、光格子と呼ばれるレーザー光の定在波によってつくられた周期的なポテンシャルに導入した系は、固体中の電子系とのアナロジーから、強相関量子多体系を研究する新しい実験系として注目を集め、盛んに研究されている。特に、不純物や格子欠陥のない、理想的な系を対象とすることができることや、系のパラメーターを高い精度で制御可能であることが大きな特徴であり、このようなことから、光格子中の冷却原子を用いた実験は、量子多体系に対する量子シミュレーション実験と認識されている。

このような背景のもと、本論文の研究では、原子種として2電子系原子であるイッテルビウム原子を用いて、そのユニークな特徴である、2つの安定な軌道状態、すなわち、基底状態 1S_0 と準安定状態 3P_0 に着目し2つの研究を行った。まず第1の研究では、イッテルビウムの2つあるフェルミ同位体の内、核スピン1/2を有する ^{171}Yb 原子に着目して、この同位体が近藤効果の研究に必要な反強磁性スピン交換相互作用を有していることを高分解能レーザー分光により明らかにし、さらに遍歴・局在混合次元の系を構築し、スピン交換ダイナミクスの直接測定に成功した。第2の研究では、イッテルビウムのもう一つのフェルミ同位体である、核スピン5/2を有する ^{173}Yb 原子に着目して、スピン空間におけるユニークな量子輸送の実験系を構築し、オーミックな輸送特性の観測や3端子系の量子輸送の実証などに成功した。

これらは、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。今後、光・原子物理学、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、令和3年2月8日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

要旨公表可能日： 2021年3月23日以降