

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	富田隆文
論文題目	Quantum Many-Body Dynamics of the Bose-Hubbard System with Artificial and Intrinsic Dissipation (人工的および内在的な散逸下でのボース・ハバード系の量子多体ダイナミクス)		

(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。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、まず、原子種としてボース粒子であるイッテルビウム (^{174}Yb) 原子を用いてボース・アインシュタイン凝縮体を生成し、それを3次元光格子に導入することにより理想的にボース・ハバードモデルに従う系をまず用意した。この系を用いて下記の2つの研究を行った。

まず第1の研究では、原子同士の非弾性衝突の強さを光によって人工的に制御する手法を確立し、ボース・ハバードモデルの系に導入することにより、「制御された散逸下のボース・ハバードモデル」という新しい系を生成し、その超流動・モット絶縁体転移に及ぼす影響を、原子数ロス、位相コヒーレンス、などを詳細に調べることににより明らかにした。成果として、まず、1) 2原子から特定の周波数の光を照射することにより分子を生成する光会合過程を利用して、2原子同士の非弾性衝突過程を光によって人工的に制御する手法を確立し、これを1格子点に1原子までの充填率のモット絶縁体状態を初期状態に適用することにより、散逸の大きさが強い場合には、原子ロスが抑制される、という現象を観測し、これを量子ゼノ効果に説明することに成功した。また、2) 散逸の大きさを変化させながら超流動・モット絶縁体転移の振る舞いを原子数ロスおよび位相コヒーレンスの振る舞いを精密に調べ、強い散逸の存在によって、モット絶縁体の融解が遅れ、超流動性を特徴つける位相コヒーレンスの発達が抑制されることを新たに見出し、最新の理論計算との定性的に一致することを確認した。最後に、3) 強い散逸を印可することによって融解を遅らせたモット絶縁体状態に対して、急速に散逸をクエンチさせ、その後の原子数および位相コヒーレンスの振る舞いを精密に調べることによって、散逸によって抑制されていた位相コヒーレンスがホッピングの時間スケールで復活し、遅れていたモット絶縁体の融解が進むことを観測した。これは、散逸によって融解が抑制されたモット絶縁体状態が、熱的な緩和された状態とは異なることを実験的に確認しただけでなく、制御された散逸の系が非平衡量子多体ダイナミクスの研究の新しい系を提供することを示した。

第2の研究では、大きな2原子非弾性衝突過程が存在するイッテルビウム原子の準安定状態 $^3\text{P}_2$ で散逸ボース・ハバードモデルの系を構築し、この内在する散逸下での

ボース・ハバードモデルの振る舞いを明らかにした。成果として、まず、1) 準安定状態 3P_2 のボース・ハバードモデルにおけるオンサイト相互作用の大きさを、新たな2段階励起分光法を開発して、精密に決定することに成功した。次に、2) 大きな散逸が存在するためにこれまで困難であった準安定状態 3P_2 における量子多体状態の生成に対して、強相関量子多体系であるモット絶縁体状態を生成する新たな手法として、まず散逸のない基底状態において1格子点に1原子までの充填率のモット絶縁体状態を生成し、高い効率で準安定状態にコヒーレントに励起する手法を開発した。さらに、これを用いて、3) 超流動・モット絶縁体転移の振る舞いについて位相コヒーレンスの振る舞いを精密に調べ、散逸の存在によって、モット絶縁体の融解が遅れ、超流動性を特徴づける位相コヒーレンスの発達が抑制されることを、この系においても見出した。それと同時に、散逸の大きな準安定状態 3P_2 においても小さいながらも位相コヒーレンスが発達し超流動状態を発現することを初めて見出した。最後に、4) 上記のようなモット絶縁体の融解の遅れる現象が、散逸と相互作用のためであり、ホッピングエネルギー自体が小さいためではないことを、光超格子を用いた原子分布の非平衡状態を生成することで確認した。

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、まず、原子種としてボース粒子であるイッテルビウム (^{174}Yb) 原子を用いてボース・アインシュタイン凝縮体を生成し、それを3次元光格子に導入することにより理想的にボース・ハバードモデルに従う系をまず用意した。この系を用いて下記の2つの研究を行った。

まず第1の研究では、原子同士の非弾性衝突の強さを光によって人工的に制御する手法を確立し、ボース・ハバードモデルの系に導入することにより、「制御された散逸下のボース・ハバードモデル」という新しい系を生成し、その超流動・モット絶縁体転移に及ぼす影響を、原子数ロス、位相コヒーレンス、などを詳細に調べることにより明らかにした。第2の研究では、大きな2原子非弾性衝突過程が存在するイッテルビウム原子の準安定状態 $^3\text{P}_2$ で散逸ボース・ハバードモデルの系を構築し、この内在する散逸下でのボース・ハバードモデルの振る舞いを明らかにした。

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、平成31年1月11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： 年 月 日以降