

論文の内容の要旨

論文題目	光マイクロトラップアレー中の冷却リユードベリ原子を用いた量子シミュレータ
学位申請者	田村 光

本論文は、冷却リユードベリ原子を用いた量子シミュレータの開発を目的として行った研究をまとめたものである。

近年、磁性体や超伝導体などの量子多体系の物理的な性質を調べるため、これらの系と同じ物理法則に従う別の物理系で模倣させる量子シミュレーションに多くの関心が集まっている。これはこのような量子多体系を従来の計算機シミュレーションを行おうとすると、粒子数の増加に従って計算リソースが指数関数的に増加し、解析が困難になるからである。このような量子シミュレーションは今までに中性原子、イオン、超伝導素子などを用いて既に実演され、様々な量子多体系の物性を模倣可能であることが示され、今後の幅広い発展が期待されている。

このような背景のもと、本論文では、以下の2点に特化した量子シミュレータをボトムアップ方式で開発した。1つ目は、スピン配置の自由度である。空間光位相変調器により個々のトラップ位置を制御することで、光格子系では実現が難しいスピン配置を再現することができる。2つ目は、スピン間の相互作用領域の拡張である。リユードベリ原子と呼ばれる高い励起状態に原子を励起し、リユードベリ原子間の大きな相互作用をもちいることで、スピン間に長距離相互作用を生成する。この大きな相互作用により、量子多体系の原子間距離を数 μm まで大きくできるため、個々の単一原子を高効率に観測できる点も特徴の1つである。

本論文では、イジングスピンモデルを実験的に再現し、励起子間の相関が徐々に形成され、その後相関を保ったままダイナミクスが発展していく振舞いを観測した。さらに、スピンをリング状(周期的境界)や有限1次元状(開境界)などに配置し、 2^N 個のヒルベルト空間を解析すると、スピン配置に応じ特定の状態が選択的に励起される実験的に明らかにし、これはイジングモデルの理論計算より得られる結果と合致する。

本論文は以下の6章からなる。

第1章は序論であり、本研究の背景と動機が示されている。近年急速に発展している様々な物理系を用いた量子シミュレーションを概観後、中性原子系において本研究で開発する量子シミュレータの開発意義を示している。

第2章では、空間光位相変調器を用いて任意の配置の光マイクロトラップアレーを実現するための手法やその原理について述べている。特に、原子の測定誤差を低減するため、全てのトラップ深さを高い精度で揃えて均一なトラップアレーを実現する方法を開発したので、その原理およびその実験結果を示している。

第3章では、磁気光学トラップから光マイクロトラップアレーへの単一原子のローディング方法と、光マイクロトラップアレーのトラップ特性の評価実験について述べる。さらに、トラップ内の単一原子の内部状態の初期化を行い、基底状態間の内部状態操作を行うことで初期化効率の評価を行った。これらの実験により実験系におけるパラメータや初期化効率などを測定し、リュードベリ励起実験を行う準備を行った。

第4章では、リュードベリ状態の特徴を簡潔に述べた後、単一原子のリュードベリ状態への励起を行い、単一原子レベルから生じるデコヒーレンス要因の解明を行う。さらに、2~4個の単一原子からなる原子アレー中のリュードベリブロック効果の観測を行った実験について述べる。ブロック領域内に原子を配置することで、N個の内1個の原子のみが励起され、さらに観測するまでどの原子が励起されたか分からない状態、すなわちN個の状態の重ね合わせ状態の観測に成功した。さらに、励起パターンを詳細に解析すると、 $nD_{5/2}$ 状態間の相互作用の異方性の効果が反映していることが確認された。

第5章では、N個の原子系に励起光を照射した際のリュードベリハミルトニアンとイジングハミルトニアンの対比を行う。そして、N=5個の有限1次元配置やN=6個のリング配置の単一原子アレーに励起光を照射し、 2^N 個全ての励起パターンを解析し、理論計算との比較を行った。現状の実験結果より、デコヒーレンス要因の解明を行う。また、有限1次元配置における開境界が系のダイナミクスにもたらす効果や、周期的境界を持つリング配置特有の幾何学的な重ね合わせ状態を示唆する結果を得た。

第6章は、本論文のまとめと将来への展望を述べている。

論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名 田村 光

審査委員主査 中川 賢一

委員 岸本 哲夫

委員 渡辺 信一

委員 斎藤 弘樹

委員 宮本 洋子

この博士論文は、光マイクロトラップアレー中の冷却リユードベリ原子を用いた量子シミュレータの開発に関する研究をまとめたものである。

論文は6章から構成されている。第1章では、この研究の背景となる最近の量子コンピュータおよび量子シミュレータに関する研究を紹介して、本論文のテーマである冷却原子を用いた量子多体系の量子シミュレーションの重要性および研究課題を説明している。先ず超伝導体や磁性体などの量子多体系の物性を精密に調べるには従来の計算機シミュレーションでは限界があり、これを可能にするのは量子コンピュータまたは量子シミュレーションであることを述べ、その中でも本研究で取り上げる冷却原子を用いた量子シミュレーションが非常に有望であることを説明している。さらに原子のリユードベリ状態および空間位相変調器を用いた光マイクロトラップを用いることにより多様な量子スピン系のシミュレーションが可能であることを指摘し、これを実現するために行った一連の研究内容の概要を紹介している。

第2章では、冷却原子を用いた量子シミュレータを実現するのに必要となる2次元光マイクロトラップアレーの開発について述べてある。コンピューターホログラムと空間位相変調器を用いた方法により、1次元および2次元の任意の空間配置の多数の光マイクロトラップを作る方法を説明し、さらに実際にこれを用いて冷却Rb原子を1個ずつトラップした結果について説明している。次に多数の光マイクロトラップのポテンシャルの深さを高い精度で均一にするためのフィードバック制御法を開発したことについて説明があり、この方法を用いて均一なトラップアレーが実現され、各トラップ中の原子数の測定誤差を非常に小さくすることが可能になったことを示している。このトラップの均一性は高精度な量子シミュレーションの実現に必要とされる重要な要素の一つである。

第3章は、光マイクロトラップアレーへの単一Rb原子のローディング方法改善に関して行った実験結果と、トラップ中の単一Rb原子の内部量子状態のコヒーレント操作に関して行った実験結果について述べてある。量子スピン系の量子シミュレーションを行うには、数10個のトラップにそれぞれ原子を1個ずつトラップする必要があるが、従来のレーザー冷却と光双極子トラップを用いた方法ではこの確率は50%に制限されていた。これに対し、正に離調した光による光誘起衝突を用いることにより、この確率を80%以上に改善可能であることを実験的に明らかにした。次に10個以上の多数のトラップ内の個々の原子に対して内部量子状態の初期化を行い、さらにレーザー光による内部状態間のラマン遷移によってコヒーレントな量子状態制御を行うことが可能であることを示した。これらの結果は数10個以上の量子スピン系の量子シミュレーションを実現するのに大きく貢献するものである。

第4章では、原子をレーザー光でリユードベリ状態に励起して複数の原子間に量子もつれ状態を実現する方法およびその実験結果について述べている。強磁性や反強磁性などの物性を示す量子スピン系をシミュレーションするには近接するスピン間の向きに依存した相互作用の実現が不可欠である。これに対して、原子をレーザー光で主量子数 n が50以上のリユードベリ状態に励起することにより、励起原子間に大きなvan der Waals型相互作用が働き、1個の原子が励起されると近傍の原子のエネルギー準位がシフトしてリユードベリ状態への励起が抑圧されるリユードベリブロック効果が起こることを2~4個の原子を用いて実験的に明らかにした。これは量子シミュレーションの実現に必要な複数の原子間の量子もつれ状態が実現可能であることを示したものである。

第5章では、開発した冷却リユードベリ原子を用いた量子シミュレータを使ってイジングモデルで表される量子スピン系のシミュレーションの実験結果について述べてある。6個の原子からなるリング型格子を用いて境界が無い周期的1次元格子のシミュレーションを行い、隣合うスピンの向きが反平行となる反強磁性空間秩序構造が出現されることを示した。また観測されたスピン状態のダイナミックスを理論計算と比較することにより、この系が量子多体系のコヒーレントなダイナミックスを再現していることを明らかにした。次に5個の原子を直線状に並べた一次元格子を用いて同様のシミュレーションを行い、先と同様の反強磁性秩序構造の出現を観測し、またリング格子の場合と異なり両端の境界の影響が現れることを確認した。

第6章は、上記の研究結果をまとめ、さらに今後の研究の展望について述べている。

本研究によって、光マイクロトラップ中の冷却リユードベリ原子の系が強く相互作用して量子もつれ状態となる量子スピン系の振る舞いを十分実現可能であることを示し、この系が量子多体系の量子シミュレータとして有望であることを明らかにした。同様の研究は、ごく最近、海外のグループからも報告されているが、本研究はこの結果を裏付けるもので、この分野に非常に重要な貢献をもたらすものである。

以上、本論文は冷却リユードベリ原子を用いた量子スピン系の量子シミュレータの原理を実験で実証し、この方法の有用性を明らかにしたものである。これらの研究内容は博士(理学)の学位論文として十分な価値を有するものと認める。