

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

田村 光

金属や超伝導素子、磁性体などの身の回りにある様々な物質の物理的特性は、物質中の個々の電子の振舞いやその相互作用により支配されている。しかしながら、このような複数の量子が相互作用しあう量子多体系は、粒子数が $N = 50$ 個でも現在のコンピュータでは厳密に解析することが難しいことが知られている。その理由は、粒子数の増加に対して系の取り得る量子状態が指数関数的に増大し、膨大な計算機リソースを要するためである。量子多体系を解析するもう一つのアプローチとして量子シミュレーションが挙げられる。量子シミュレーションは、中性原子・イオン・超伝導素子などの物理系を用いて量子多体系を記述するハミルトニアンを模擬的に再現し、個々の粒子の振舞いを実験的に解析する手法である。この手法により、未解決の物性の解明や物質の新たな機能探索が可能になるとして期待されている特に近年では量子シミュレータを構成する物理系の特色を生かすことで、粒子間の相互作用の相互作用パスや相互作用の大きさ、粒子配置などのパラメータの自由度の高い量子シミュレータの開発が着目されている。この技術により、多種多様な物質に対応させるだけでなく、対応物が存在しない系を実現することも可能になると期待されている。

本研究の目的は、冷却中性原子とリユードベリ状態間の大きな相互作用を用いて様々な量子多体系を再現可能な量子シミュレータの開発である。この手法の特徴は、リユードベリ状態間の大きな相互作用により各原子間距離を数 μm 以上離すことが可能となるゆえ、容易に単一サイトごとの観測・操作が実現できる点にある。さらに、空間光位相変調器 (Spatial Light Modulator: SLM) によって生成された光マイクロトラップアレーを用いることで、プログラマブルに原子配置を制御することが可能となる。このようなリユードベリ原子系は磁場印加中のイジングスピンモデルにマッピングできるため、複雑なスピン配置となるフラストレートを有するスピン系のシミュレーションや量子アニーリングといった応用が期待できる。

本量子シミュレータの開発にあたり、我々はまず単一原子の観測効率に着目した。原子に刻まれたスピンの状態を読み取るためには、特定の内部状態にある単一原子の蛍光観測を行う。この際、単一原子あたりの観測効率が $\eta = 0.99$ であっても、 $N = 50$ 個の原子では観測効率は $\eta^{50} \simeq 0.61$ まで低下することが推測される。それゆえ、精確なシミュレーション結果を得るためには、個々の原子の観測効率の向上が必須である。しかしながら、SLMにより多数の光トラップを形成すると、実際の光学系に依存して各ピーク強度にバラつきが生じ、単一原子の観測効率の悪化をもたらす。これは、各トラップの光シフトの不均一性により、蛍光の散乱レートが異なるためである。本研究では、実際のトラップ平面におけるピーク強度のバラつきを単一原子から得られる蛍光を用いて均一化する手法を開発し、 $N = 62$ 個のトラップ数においても全原子の検出効率を $\eta^{62} > 0.95$ まで向上できることを実証した。

そして、均一化された光マイクロトラップの全サイトに単一原子を充填し、数値計算可能な少数スピン系 ($N \leq 6$) のイジングモデルの実験シミュレーションを行った。ここでは、単一原子をリング状に並べたアレーや一次元状に並べたアレーを用いて、多体状態のダイナミクスやスピンの密度分布、スピンスピン相関の測定を行った。得られた実験結果とイジングモデルの計算結果との比較を行い、リュードベリ原子系特有の効果についての考察を行った。さらに、有限システムの境界の有無が系にもたらす効果を検証し、リング状のスピン配置では幾何学的な重ね合わせ状態を示唆する結果を得た。本研究によって得られた成果は、単一原子の高効率観測を実現可能なトラップアレーの生成方法を確立し、SLMとリュードベリ原子を組合わせた量子シミュレータの発展に大きく貢献した。