

氏 名 溝口 道栄

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2217 号

学位授与の日付 2021年3月 24日

学位授与の要件 物理科学研究科 機能分子科学
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 強相関・極低温リユードベリ原子気体を用いた量子多体ダイ
ナミクスの研究

論文審査委員 主 査 石崎 章仁
構造分子科学専攻 教授
大森 賢治
機能分子科学専攻 教授
田中 清尚
構造分子科学専攻 准教授
杉本 敏樹
機能分子科学専攻 准教授
段下 一平
近畿大学 理工学部 准教授

(様式3)

博士論文の要旨

氏名 溝口 道栄

論文題目：強相関・極低温リュードベリ原子気体を用いた量子多体ダイナミクスの研究

Quantum many-body problems dominate over a variety of physical and chemical phenomena ranging from the emergence of superconductivity and magnetism in solid materials to chemical reactions in liquids. Understanding many-body problems is thus one of the central goals of modern sciences and technologies. However, it is extremely difficult to solve quantum many-body problems with classical computers since the number of states grows exponentially with the number of particles in the system. Accordingly, another new approach referred to as “quantum simulation”, where many-body problems are experimentally simulated with highly-controllable artificial quantum many-body systems, attracts much attention recently. Atomic, Molecular and Optical (AMO) Physics has recently been emerging as an ideal platform for quantum simulation. Its latest developments include studies on many-body correlations induced by long range interactions. From this viewpoint Rydberg atoms are expected as the most promising building blocks of artificial quantum many-body systems for quantum simulators, due to their large dipole moments and high controllability of the nature and strength of their interactions.

In this thesis I have succeeded in constructing a new quantum many-body system of a Rydberg-atom crystal, in which we load a Bose-Einstein condensate of ultracold rubidium atoms, whose temperature is nearly absolute zero kelvin, into an optical-lattice potential, whose lattice spacing is 532 nanometer, and excite those many atoms to Rydberg states with an ultrashort pulsed laser, so that we can control their interaction strength and character. Moreover, with this system we have succeeded for the first time in creating a “metal-like quantum gas”, in which Rydberg electronic orbitals are spatially overlapped between the neighboring lattice sites [M. Mizoguchi *et al.*, “Ultrafast Creation of Overlapping Rydberg Electrons in an Atomic BEC and Mott-Insulator Lattice”, *Phys. Rev. Lett.* **124**, 253201 (2020)].

In order to confirm the creation of the “metal-like quantum gas”, we have studied spontaneous ionization of the Rydberg-atom crystal. Beyond a threshold principal quantum number where Rydberg orbitals of neighboring lattice sites overlap with each other, the atoms efficiently undergo Penning ionization resulting in a drastic change of ion-counting statistics, sharp increase of avalanche ionization, and the formation of an ultracold plasma. These observations signal the actual creation of the “metal-like quantum gas”, which is further confirmed by a significant difference in ionization dynamics between a Bose-Einstein condensate and a Mott insulator.

The experimental results can be summarized in the following simple model shedding new light onto the ionization dynamics of an ultracold Rydberg gas: When the wave-function overlap is negligible, ionization occurs only through accidental primary ions being created, e.g., by motion-induced Penning ionization or other processes. The electrons freed by this process might eventually ionize other Rydberg atoms in an avalanche-like process. Only a small fraction of the Rydberg gas gets ionized actually, and formation of an ultracold plasma is excluded. If, however, spontaneous initial Penning ionization is facilitated by laser excitation of overlapping Rydberg-pair states, subsequent avalanche processes result in ionization of large fractions of Rydberg atoms and efficient formation of an ultracold plasma. This reasoning also explains the striking contrast between the Bose-Einstein condensate and Mott insulator.

The ionization and plasma formation under precisely controlled initial conditions demonstrated in this thesis provides a novel path toward the study of the competition between kinetic energy and electron-electron interactions in crystal structures. This competition underlies a vast range of the most elusive phenomena in strongly correlated physics. The present work provides us with a better understanding of the stability of many-body Rydberg systems and the mechanism for ultracold plasma formation. In the system constructed in this thesis, which is characterized by very low temperature and controlled atomic-pair distance, Penning ionization sets in at times shorter than 60 nanoseconds once the electronic-pair wave function shows significant overlap. This finding is consistent with previous theoretical predictions. For a pair of atoms with overlapping electronic wave functions the timescale for Penning ionization is estimated to be around 1-20 nanosecond. This allows observation of delocalized electron states using our ultrafast Ramsey interferometry with attosecond precision on picosecond timescales before they decay through Penning ionization.

This brand new “ultrafast quantum simulator”, where we have combined an artificial quantum many-body system and ultrafast coherent control with attosecond precision for the first time, would develop into a pathbreaking platform for quantum simulation.

博士論文審査結果

Name in Full 氏 名 溝口 道栄

論文題目 強相関・極低温リユードベリ原子気体を用いた量子多体ダイナミクスの研究

量子多体問題は超伝導や磁性の発現から化学反応にいたる様々な物理・化学現象を支配している。したがって、量子多体問題を理解することは現代科学技術における中心課題の一つである。しかし、多数の粒子が相互作用する量子多体系では状態の数が粒子数に対して指数関数的に増大するため、量子多体問題を古典コンピュータで解くことは極めて難しい。一方、量子多体問題に対する新しいアプローチとして、制御性の高い量子多体系を人工的に作り出し、これを用いた模擬実験によって量子多体問題を理解する「量子シミュレーション」と呼ばれる手法が近年注目を集めている。出願者は、本博士論文において、(1) 絶対零度近傍まで冷却したルビジウム原子集団のボース・アインシュタイン凝縮体を光格子ポテンシャルに導入、さらに超短パルスレーザーでリユードベリ状態に励起することによる制御性の高い量子多体系の構築、(2) 光格子の隣接サイト間でリユードベリ電子軌道が空間的に重なり合った「金属状の量子気体」の創出、(3) 平均場近似では説明不可能な多体相関に起因する超高速電子ダイナミクスの解明、に関する実験研究を行っている。

第一章では、光格子中の極低温原子集団および長距離相互作用と極低温リユードベリ原子を中心に、本研究の背景と量子多体問題の量子シミュレーション研究における位置付けについて纏めている。

第二章では、光格子中の極低温原子集団を生成するための理論背景と実験系について纏めている。レーザー冷却等を用いてほぼ絶対零度まで冷やしたルビジウム原子集団のボース・アインシュタイン凝縮体を 532nm の格子間隔を有する光格子ポテンシャルに導入し、光格子の各サイトに 1 個ずつ原子が配列した「光格子中の極低温原子集団」の生成に成功している。

第三章では、リユードベリ原子の理論背景と基本的なリユードベリ励起実験について詳述している。ナノ秒のパルスレーザーを用いてリユードベリ励起スペクトルを測定し、 $25D$ から $60D$ よりも高いリユードベリ状態を分光することに成功している。これにより、イオン化検出システムが問題なく動作することを確認している。また、それぞれのリユードベリ状態がイオン検出器に到達するまでの時間を解析し、ピコ秒パルスレーザーによるリユードベリ励起時に励起されたリユードベリ状態を帰属することに成功している。これらの技術により、光格子中の極低温リユードベリ原子集団を生成する準備を整えている。

第四章では、光格子の隣接サイト間でリユードベリ電子軌道が重なり合った「金属状の量子気体」の生成について研究をまとめている。第三章に記載された成果をもとに、光格子中の極低温原子集団をピコ秒パルスレーザーでリユードベリ状態へ励起し、リユードベリ原子が三次元的に規則配列した「光格子中の極低温リユードベリ原子集団」を実現している。リユードベリ励起後に形成されるイオンの計数統計を測定し、イオン生成量（初期

リュードベリ原子数で規格化した生成イオン数の中央値), 生成したイオン数分布のポアソン分布からのずれ (マンデル Q パラメータ), 極低温プラズマの生成確率 (初期リュードベリ原子数の $2/3$ よりも多いイオンが生成する事象の割合) という3つの物理量が光格子の隣接サイト間でのリュードベリ電子軌道の重なりの有無によって急激に変化することを示している。これにより, 光格子の隣接サイト間でリュードベリ電子軌道が重なり合った「金属状の量子気体」が生成されていることを実証している。また, ボース・アインシュタイン凝縮体とモット絶縁体に対応する状態をそれぞれリュードベリ励起した際のイオン生成の比較実験からも「金属状の量子気体」の生成に成功したことを裏付けている。

第五章では, 光格子中の極低温リュードベリ原子集団の超高速多体電子ダイナミクスの観測について研究をまとめている。光格子の隣接サイト間でリュードベリ電子軌道の重なりが無視できる $35D$ を用いて, 光格子中の極低温リュードベリ原子集団にアト秒精度の時間領域ラムゼー干渉法を適用し, 平均場モデルでは捉えることが不可能な超高速多体電子ダイナミクスの観測に成功している。遅延時間がアト秒精度で安定化されたレーザーパルス対を用いて, 1フェムト秒周期のラムゼー振動を1ナノ秒近く測定している。長距離相互作用によるラムゼー振動のコントラストと位相シフトの時間変化は平均場モデルでは全く説明できない一方で, イジング型の多体相関モデルによって適切に説明されることを明確に示している。以上から, 実験観測された超高速多体ダイナミクスは, 平均場モデルでは捉えることが不可能な多体相関効果を反映したものであることを明らかにしている。

第六章では, 本研究の総括を行い, さらに, 人工量子多体系とアト秒精度のコヒーレント制御技術を組み合わせた超高速量子シミュレータによる量子多体ダイナミクス研究に関して今後の展望を述べている。

以上の研究成果は, 光格子中の極低温原子結晶に世界で初めて超高速光技術を適用することによって量子シミュレーション技術および量子多体系研究に新局面を切り開くものである。本学位論文の一部は, 既に1報の学術論文として物理学分野を代表する査読付き国際誌に発表されており, その内容は国際的にも高い水準を満たしていると評価された。

以上により, 本論文は博士 (理学) の学位授与に値すると審査員全員一致で判断した。