

氏 名 周 諭来

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2344 号

学位授与の日付 2022 年 9 月 28 日

学位授与の要件 物理科学研究科 機能分子科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 光ピンセット配列中の冷却リユードベリ原子を用いた超高速量子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
山本 浩史
構造分子科学専攻 教授
杉本 敏樹
機能分子科学専攻 准教授
武田 俊太郎
東京大学 大学院工学系研究科 准教授
福原 武
理化学研究所 量子コンピュータ研究センター
チームリーダー

(様式3)

博士論文の要旨

氏 名 周 諭来

論文題目 光ピンセット配列中の冷却リュードベリ原子を用いた超高速量子ダイナミクス
の研究

Tremendous progress in quantum technologies during the past decades enables us to benefit from quantum properties to overcome certain classical limits of measurement precision, sensor's sensitivities, computational speed etc. Especially for quantum simulation and computation, various platforms such as trapped ions, superconducting qubits, and cold atoms have now reached a control of up to several tens of individual quantum objects with controllable interactions, or gates, between them. To obtain useful simulation and computation results in such systems, it is important to reach a critical fidelity of quantum operations. This requires the operations orders of magnitude faster than the timescale set by couplings to environments which cause decoherence. There has thus been a continuous strive to better insulate qubits from environments and to design faster quantum operations. Among the latter, a particularly important quantum operation is the entanglement of two qubits. As this operation is mediated by an interaction between those two qubits, the operation time should be lower-bounded by a platform-dependent speed limit determined by its interaction strength. Devising and realizing two-qubit gates operating at this speed limit are the subjects of intense efforts on all platforms.

Ultracold atoms, with their scalability, long coherence time, high degree of controllability, efficient detection methods, and large range of physical properties (broad and narrow optical transitions, nuclear and electronic spins, long lived Rydberg orbitals...), are a powerful platform for quantum simulation and quantum computation. In this thesis work, we trap ultracold single ^{87}Rb atoms in arrays of optical tweezers. In order to induce an interaction between two atoms, they are laser excited to Rydberg states, which are highly excited states with large dipole moments. The strong dipole-dipole interaction at the atomic distance of few micrometers can then be used to operate entanglement between those two atoms. However, entangling protocols using such Rydberg atoms were always performed so far in an adiabatic regime much slower than the speed limit set by the dipole-dipole interaction strength. Here we design and construct a new experimental method and apparatus to perform quantum simulation and computation on an ultrafast timescale to reach this quantum speed limit for the first time. With this apparatus, we have performed experiments observing an ultrafast energy exchange between two Rydberg atoms. This ultrafast coherent dynamics gives rise to a conditional phase which is the key resource for an ultrafast controlled-Z gate

faster than any other Rydberg gates by two orders of magnitude. This groundbreaking result opens the path for quantum simulation and computation operating at the speed-limit set by dipole-dipole interactions with this ultrafast Rydberg platform.

In this thesis, I first describe the new experimental apparatus including a vacuum system, lasers, and optics. This apparatus was designed and constructed to overcome the stringent requirements to manipulate the atoms at a short interatomic distance down to $1\ \mu\text{m}$ for strong dipole-dipole interactions, and at the same time to fulfill the request to conduct experiments using Rydberg atoms. We succeeded in assembling defect-free arrays of up to 50 ^{87}Rb atoms and characterizing the properties of those single atoms in the tweezers (trap frequencies, trap depths, temperatures etc.). The distances between the atoms are controlled precisely using a spatial light modulator and detected with a precision of 10 nm. Then, we developed a new ultrafast-excitation scheme using picosecond laser pulses to excite the atoms in only tens of picoseconds from the ground state to a Rydberg state with a high population. With this method, we realized a Rabi oscillation between the $5P$ and Rydberg states for up to 2π , which is required to perform a pump-probe experiment with two π pulses. Furthermore, we extended the delay line of the attosecond-phase-modulator (APM), our homemade ultra-stable optical interferometer generating pump and probe pulses, from 500 ps to 6.5 ns, allowing us to probe an interaction on the GHz scale (i.e. nanosecond timescale). The APM was used to perform Ramsey-interferometric experiments in which the pump-probe delay was controlled with attosecond precision.

Finally, we observed and controlled the ultrafast dynamics between 2 single Rydberg atoms. We performed a pump-probe experiment with an interaction time of 6.5 ns as a function of the distance between a pair of atoms, which was tuned from 5 to 1.5 micrometers, to observe their ultrafast energy exchange, which is the Förster oscillation between the $|43D, 43D\rangle$ and $|41F, 45P\rangle$ pair states. This Förster dynamics is well explained by considering the position uncertainty of the atoms in the tweezers as well as the full interaction including resonant and off-resonant couplings with other pair states. In addition, we performed a Ramsey-interferometric pump-probe experiment to observe the conditional phase $\sim \pi$ acquired during the interaction, with the results matching ab-initio calculations considering the full interaction Hamiltonian. This conditional phase $\sim \pi$ is acquired in only 6.5 ns, more than 100 times faster than in any other Rydberg experiments with individual atoms to date, and is the key resource for a novel ultrafast two-qubit gate operating at the fundamental speed limit.

The work presented here will be the first step to realizing ultrafast quantum simulation and quantum computation with the cold-atom-tweezers platform, and also provide new knowledge for the Rydberg physics community. Moreover, the ultrafast approach demonstrated here might contribute to the progress of other platforms such as trapped ions and superconducting qubits, which also share the common aim of performing high-fidelity quantum simulation and quantum computation.

博士論文審査結果

Name in Full
氏 名 周 諭来Title
論文題目 光ピンセット配列中の冷却リユードベリ原子を用いた超高速量子ダイナミクスの研究

出願者は本博士論文において、(1) レーザー冷却により絶対零度付近まで冷却した ^{87}Rb 原子気体の生成とリユードベリ状態への選択的励起、(2) 光ピンセット技術を用いた欠陥の無い任意形状の原子配列生成、(3) 超短パルスレーザーを用いた原子間の超高速ダイナミクスの観測・制御の技術を融合させることで、量子シミュレーション・量子コンピューティングを行うための「超高速リユードベリプラットフォーム」の開発に挑み、量子スピード限界に迫る超高速量子シミュレータ装置の開発とリユードベリ原子間の超高速エネルギー交換ダイナミクスの観測に関する実験研究を行っている。

第一章では、本研究の背景と位置付けについて纏めている。

第二章では、超高速リユードベリプラットフォームを開発するために新規に設計・実装された真空装置、対物レンズ、電気回路、レーザーシステムなど実験装置について詳述している。

第三章では、光ピンセット配列中の ^{87}Rb 原子に関する実験結果について述べている。量子シミュレーション・量子コンピューティングのプラットフォームとして十分な数の原子を任意形状に配列するために、空間光変調器と二次元音響光学偏向器を用い、最終的に最大 800 個の ^{87}Rb 原子から成る任意形状の配列形成に成功している。また、トラップ周波数やトラップ深さといった、光ピンセットを特徴づけるパラメータを実験的に求めることにも成功している。

第四章では、光ピンセット配列中に導入された単一 ^{87}Rb 原子を、超短パルスレーザーを用いてリユードベリ状態へと励起し、単一原子レベルで量子状態操作する実験について記述している。新たに開発された二段階励起手法を用いることで、従来手法に比較して 100 倍以上も高速に ^{87}Rb 原子をリユードベリ状態へと励起することに成功している。また、対物レンズにより、光ピンセット配列中の原子 1 つ 1 つにおける最大ポンプ・プローブ遅延が 6.5 ns 程度となるラムゼー振動の観測に成功している。

第五章では、本博士論文の主要な研究結果である 2 つのリユードベリ原子間における超高速エネルギー交換ダイナミクスについて記述している。光ピンセットの運動基底状態まで冷却された ^{87}Rb 原子を、ピコ秒パルスレーザーを用いてリユードベリ状態へと励起することにより、 $|43D, 43D\rangle \leftrightarrow |45P, 41F\rangle$ 状態間のエネルギー交換ダイナミクスを観測することに成功している。さらに、アト秒精度のラムゼー干渉実験を行うことで、二原子波動関数 $\exp(i\phi)|43D, 43D\rangle$ に付与される条件付き位相 ϕ に関する情報を獲得することに成功し、また理論予測との一致を確認している。このダイナミクスはナノ秒時間スケールにおけるものであり、数十マイクロ秒スケールのデコヒーレンス効果や 1 マイクロ秒ス

ケールのレーザー位相ノイズなどに対して頑健である。したがって、より忠実度の高い量子ゲート操作への応用が可能となり、制御 Z ゲートなど 2 量子ビットゲートの重要なリソースとして用いることができる。リュードベリ原子を用いた一般的な量子コンピューティング・プラットフォームであるブロケード型ゲートに比較して 2 桁以上速いゲート操作を行うことが可能となり、より高い忠実度を得ることが期待できる。

第六章では、研究の総括を行い、さらに、より高い忠実度をもつ制御 Z ゲートの実装、リュードベリ原子軌道の重ね合わせによるイオン化現象、多体系における超高速相互作用ダイナミクス、スピン 1 系の量子シミュレーションなど本研究で開発された超高速リュードベリプラットフォームを用いた展開に関して今後の展望を述べている。

以上の研究成果は、冷却原子系、光ピンセットおよび超短パルスレーザーを用いた新たな量子シミュレーション・量子コンピューティングの道筋を切り開くものであり、博士論文にふさわしい価値を有している。本学位論文の一部は、既に 1 報の学術論文として光量子科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。

以上の理由により、審査委員会は、本論文が博士（理学）の学位授与に値すると判断した。