科学研究費助成事業（特別推進研究）公表用資料
〔平成３１(2019)年度研究進捗評価用〕

平成２８(2016)年度採択分
令和元(2019)年５月 17 日現在

研究課題名（和文）　アト秒精度の超高速コヒーレント制御を用いた量子多体ダイナミクスの探求

研究課題名（英文）　Addressing Quantum Many-Body Dynamics by Ultrafast Coherent Control with Attosecond Precision

課題番号：16H06289

研究代表者
大森　賢治（OHMORI KENJI）
分子科学研究所・光分子科学研究領域・教授

研究の概要：本研究は、1000 粒子以上の量子多体系の非定常な時間発展を近似無しに 10 億分の 1 秒以下でシミュレートすることの出来る世界唯一の「超高速量子シミュレーター」を、「アト秒精度のコヒーレント制御技術」と「絶対零度付近までレーザー冷却した強相関リュードベリ原子集団」という二つの極限ツールを組み合わせて開発することを目的とする。

研　究　分　野：物理化学、原子・分子・量子エレクトロニクス
キ　ー　ワ　ー　ド：超高速コヒーレント制御、アト秒、量子多体問題、量子シミュレーター、極低温原子

１．研究開始当初の背景

超伝導・磁性材料から薬剤分子に至るまで、多くの重要な物理的・化学的機能性は、多数の原子や分子が相互作用する量子多体系によって支配されている。しかし、2020 年頃完成予定の「ポスト京」コンピューターを使ったとしても、30 粒子以上の量子多体系の定常状態を厳密に計算することは不可能であることが知られている。非定常な時間発展であれば、それよりもさらに難しい。

２．研究の目的

本研究は、1000 粒子以上の量子多体系の非定常な時間発展を近似無しに 10 億分の 1 秒以下でシミュレートすることの出来る世界唯一の「超高速量子シミュレーター」を、「アト秒精度のコヒーレント制御技術」と「絶対零度付近までレーザー冷却した強相関リュードベリ原子集団」という二つの極限ツールを組み合わせて開発することを目的とする。

３．研究の方法

実在の固体材料や液体中では、多数の原子や分子に渡って広がった多体波動関数は熱的な擾乱によって一瞬のうちに局在化してしまうので、私たちが開発したアト秒精度の超高速コヒーレント制御技術を以てしても、その途中の状態を観測することは極めて難しいと予想される。

そこで本研究では、次世代フォトニック技術［浜松ホトニクス社（HPK）と共同開発］を用いて真空中に空間捕捉した高密度の極低温ルビジウム（Rb）・リュードベリ原子集団の強相関状態（図１）をモデル系として用い、そこでの波動関数の時空間発展を追求する。真空・極低温状態なので熱的な擾乱が無視でき、リュードベリ原子の大きな双極子モーメントが強相関状態を創るのに適している。

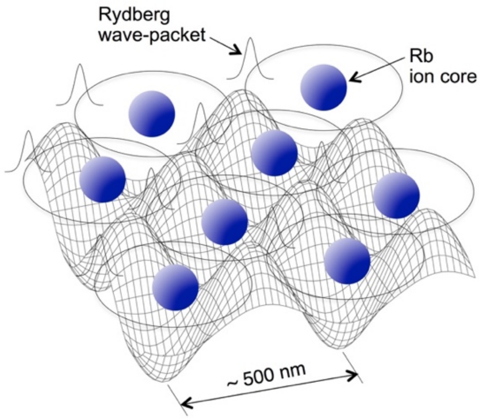

図１．超高速量子シミュレーターの概念図
(K. Ohmori, Found. Phys. **44**, 813 (2014).)

４．これまでの成果

分子研・大森グループでは、主に以下の項目について研究開発を実施した。

（１）光双極子トラップ中で乱雑に空間分布した極低温 Rb 原子集団を用いて、超高速量子シミュレーターのプロトタイプを完成させた［1 - 3］。

（２）上記のプロトタイプをアップグレードするために､光格子トラップ中で極低温 Rb 原子を３次元的に規則配列させ、各格子点に単一原子が局在するモット絶縁体を実現した。

（３）モット絶縁体のリュードベリ電子ダイナミクスを高精度に観測・制御する手法の開発を進めた。これを用いて超高速量子シミュレーションを妨げる主要な要因の一つであるイオン化現象を制御することに成功した。また、超高速量子シミュレーターの読み出しインターフェースであるアト秒精度の時間領域ラムゼイ干渉法において、世界最高レベルの確度に相当するほぼ 100%のコントラストを達成した[4]。以上の成果は、図１に示すような光格子を用いた超高速量子シミュレーターのハードウェアと読み出しインターフェースがほぼ完成したことを意味している。

（４）モット絶縁体の局所的な励起や観察、および原子の任意配列トラップのための装置開発を HPK グループと共同で実施した。また、超高速量子シミュレーターの構成・手法に関して、分子研・HPK グループ共同で日本および米国特許を出願し、研究推進のための環境整備を図った［5］。

HPK グループでは、主に以下の項目について研究開発を実施した。

（５）ホログラム技術を光学顕微鏡に導入した原子配列の任意制御技術「ホログラフィック３ 次元原子トラップ技術」の開発を進めた。HPK が有する計算機ホログラム設計の知見を導入し、原子トラップ用光パターン生成のための位相パターン設計を進め､当初は低 NA 光学系における基礎評価実験を、その後量子シミュレーター実験条件に近い高 NA 系における光パターン評価を行った。

（６）超高速量子シミュレーターで用いる様々な光波長に対応した光学素子を設計・作製した。精密光学薄膜成膜環境を整備し、原子トラップ波長からリュードベリ状態生成用波長まで、幅広い波長で反射防止機能を有する光学薄膜を設計し、これを施した真空装置窓材を分子研グループに提供した。

５．今後の計画

(１）分子研・大森グループでは、光格子およびホログラフィック原子トラップを用いて配列させた Rb 原子集団を、超短パルスレーザーによって強相関リュードベリ状態へ励起し、多体波動関数の時間発展を時間領域ラムゼイ干渉によってアト秒精度で観測する。また、Rb 原子集団の局所的な励起や観察を可能にする実験装置の開発を引き続き HPK グループと共同で進め、多体波動関数の時空間発展の観測を目指す。

（２）HPK グループでは引き続き、ホログラフィック３次元原子トラップ技術の開発、およびその周辺光学技術の整備を進める。実験の要求に対応した特殊仕様光学薄膜および素子の設計と作製を行う。また、ナノメートル領域で任意の原子配列を実現するためのホログラム技術開発も継続し、分子研で構築する超高速量子シミュレーター装置への導入を目指す。

６．これまでの発表論文等（受賞等も含む）

(1) “Direct observation of ultrafast many-body electron dynamics in an ultracold Rydberg gas,” N. Takei, C. Sommer, C. Genes, G. Pupillo, H. Goto, K. Koyasu, H. Chiba, M. Weidemüller, and K. Ohmori, Nat. Commun. **7**, 13449 (2016).

(2) “Time-domain Ramsey interferometry with interacting Rydberg atoms,” C. Sommer, G. Pupillo, N. Takei, S. Takeda, A. Tanaka, K. Ohmori, and C. Genes, Phys. Rev. A. **94**, 053607 (2016).

(3) “Ultrafast Coherent Control of Condensed Matter with Attosecond Precision,” H. Katsuki, N. Takei, C. Sommer, and K. Ohmori, Acc. Chem. Res. **51**, 1174–1184 (2018).

(4) “Attosecond Control of Restoration of Electronic Structure Symmetry,” C. Liu, J. Manz, K. Ohmori, C. Sommer, N. Takei, J. C. Tremblay, and Y. Zhang, Phys. Rev. Lett. **121**, 173201 (2018).

(5) Patent Pub. No. US 2018/ 0292 786 A1; JP 2018-180179, “Quantum simulator and quantum simulation method,” K. Ohmori, N. Takei (NINS), H. Sakai, T. Ando, H. Toyoda, Y. Ohtake, T. Hyodo, Y. Takiguchi (HPK), Pub. date: Oct. 11, 2018 (US); Nov. 15, 2018 (JAPAN).

(6) 大森 賢治、第 21 回松尾財団宅間宏記念学術賞（2017 年 10 月）

(7) 大森 賢治、文部科学大臣表彰・科学技術賞（2018 年 4 月）

ホームページ等

http://groups.ims.ac.jp/organization/ohmori_g/

ohmori@ims.ac.jp