

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 10 月 24 日現在

機関番号：63903

研究種目：特別推進研究

研究期間：2016～2020

課題番号：16H06289

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

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

研究者番号：10241580

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 436,900,000円

研究成果の概要（和文）：光双極子トラップ中の冷却ルビジウム原子集団を超高速レーザーでリユードベリ励起する独自の手法によって、多体電子ダイナミクスをアト秒精度でシミュレートする「超高速量子シミュレータ」の原型（1G実験系）を開発した。次にこれを光格子中の「リユードベリ原子結晶」へと発展させるとともに（2G実験系）、隣り合った原子の電子軌道が重なり合う新物質「金属状の量子気体」を創り出した。さらに、光ピンセットでマイクロン間隔に任意配列された単一原子の中の単一電子の動きをアト秒精度で観測できる極限性能の3G実験系へと発展させた。また、プログラマブルな乱雑配置で原子をトラップする技術確立し、乱雑系モードへの拡張に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

固体材料の超伝導性や磁性の発現から液体中の薬剤分子と標的分子の相互作用に至るまで、私たちの身の回りには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問題によって支配されている。しかし、このような強相関系の量子多体問題を現在のシリコンベースのスパコンで厳密に解くことはほぼ不可能である。本研究で開発した「超高速量子シミュレータ」は、複雑な量子多体問題を1000粒子以上について近似無しにシミュレート出来る新しいプラットフォームとして期待されている。また近年、世界中で競争が激化する量子技術開発において、我が国の競争力を強化する成果としても期待されている。

研究成果の概要（英文）：We have developed a prototype of an "ultrafast quantum simulator" (1G apparatus), which can simulate many-body electron dynamics with attosecond precision, by exciting a disordered ensemble of cold rubidium atoms in an optical dipole trap to the Rydberg states with an ultrafast laser for the first time. This prototype has been upgraded to an ordered crystal of Rydberg atoms in an optical lattice (2G apparatus), where we have created a "metal-like quantum gas", whose electron orbitals are spatially overlapped between neighboring atoms. We have further upgraded the apparatus with an arbitrary atom array assembled with optical tweezers (3G apparatus). 3G apparatus has extreme performance, where single-electron motion in a single atom in an arbitrary atom array can be observed with attosecond precision. A new technique has also been developed to trap atoms in a programmable disordered pattern, incorporated into 3G apparatus to enhance its operation mode for simulating disordered systems.

研究分野：量子物理学 原子分子光物理学 量子情報科学 物理化学

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 極低温リユードベリ原子

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

固体材料の超伝導性や磁性の発現から液体中の薬剤分子と標的分子の相互作用に至るまで、私たちの身の回りには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問題によって支配されている。しかし、このような強相関系の量子多体問題を現在のシリコンベースの古典コンピュータで解くことは極めて難しい。例えば、量子多体系を記述する最も単純な近似の一つである Hubbard 模型の定常状態を厳密対角化で求めようとする場合、2020 年頃に完成する「ポスト京」スーパーコンピュータを使ったとしても 30 粒子以上を扱うことは事実上不可能であることが知られており、仮に 1000 粒子であればその計算時間は 10 の 573 乗年と推定される。しかも、冒頭に挙げたような機能性を光など外部からの刺激で制御しようとする場合には、定常状態だけではなく、刺激を与えた後の非定常な時間発展(ダイナミクス)を求める必要がある。しかし量子多体系のダイナミクスの計算は定常状態の計算よりも格段に難しい。さらに、これらの量子多体ダイナミクスは電子-格子散乱・電子-電子散乱・溶媒分子との衝突などの熱揺らぎと競合しながら時間発展している。本研究は、このように極めて複雑な量子多体ダイナミクスを 1000 粒子以上について近似無しに 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」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ユードベリ原子集団」という世界中で私たちだけが持っている二つの極限ツールを組み合わせることを目的としている。

2. 研究の目的

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)・リユードベリ原子集団の強相関状態を固体や液体の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、リユードベリ原子の大きな双極子モーメントが数十原子以上の強相関状態を創るのに適している。このような強相関リユードベリ原子集団を創り出せるのは世界で私たちだけである。さらに、そこでの 1 フェムト秒周期の電子運動をアト秒精度で観測・制御出来るのも私たちだけである。具体的な研究項目を以下のとおり設定する。

光トラップ中にサブミクロン～ミクロン程度の間隔で規則正しく格子状に配列された極低温 Rb 原子集団をピコ秒レーザーパルスでリユードベリ電子状態に励起することによって、原子間の相互作用エネルギーが原子の運動エネルギーよりも 4 桁以上大きい強相関電子系を創り出すことが出来る。この強相関電子系とアト秒精度のコヒーレント制御および光学顕微鏡技術を組み合わせることによって、強相関量子格子模型の波動関数の時空間発展をアト秒精度で観測することの出来る超高速量子シミュレータを開発する。原子配列の任意制御は、共同研究グループである浜松ホトニクス社 (HPK) において Rb 原子トラップに特化した空間光変調器 (SLM) を開発し、SLM に表示するホログラムパターンで原子トラップ用レーザーの焦点パターンを制御する「ホログラフィック原子トラップ技術」によって行う。

以上で開発する超高速量子シミュレータは規則正しく配列された理想的な量子系での多体問題を対象にしている。一方、現実世界では規則正しく配列された多体系は稀であり、ほとんどの多体現象は熱揺らぎを始めとする何らかの空間的な乱雑さを含んでいる。そこで本研究の第 2 段階では、より現実的な乱雑系の超高速量子シミュレーションに対応した動作モードへの拡張を目指す。

3. 研究の方法

光双極子トラップ中で乱雑に空間分布した極低温 Rb 原子集団をピコ秒パルスレーザーで励起するという独自の手法によって強相関リユードベリ原子集団を創り出し、超高速量子シミュレータのプロトタイプを開発する。さらに、このプロトタイプを光格子や任意制御された光トラップ配列に捕捉された原子集団へと拡張し、超高速量子シミュレータのハードウェアを完成させる。これを用いて、多数の粒子に渡って広がった多体波動関数の時空間発展を観測することの出来る超高速量子シミュレータの開発を進める。

「ホログラフィック原子トラップ技術」について、HPK が有する計算機ホログラム設計の知見をもとに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、それらを光学的に評価する基礎実験を行うとともに、原子トラップ用の光学素子を設計・作製する。また、乱雑系の超高速量子シミュレーションを実現するための「フォトニック擬似乱数発生器」について、ランダムな輝度分布をもつ光パターンの空間相関構造および強度統計分布の両者を制御する新原理にもとづき、ホログラムパターン設計・再生技術の開発に統合して研究を行う。

大森グループが開発した超高速量子シミュレータのプロトタイプを定量的に解釈する為の新しい理論モデルを構築する。相互訪問やネット会議・Eメールによって他のグループと緊密に連携し、実験結果の解析、および研究計画などについて活発な議論を進める。

4. 研究成果

(1) 光双極子トラップを用いたプロトタイプ (1G 実験系) の開発

光双極子トラップ中の極低温 Rb 原子集団をピコ秒パルスレーザーで励起するという独自の手法によって強相関リユードベリ原子集団を創り出し、超高速量子シミュレータのプロトタイプ

ブ(1G 実験系)を開発することに成功した(図1)。ここでは、これまでの極低温リユードベリ研究のように狭帯域の連続波レーザーを用いる代わりに、広帯域の超短パルスレーザーを導入するという全く新しい発想によって桁違いの強相関状態を作り出し、その1フェムト秒周期の超高速多体電子ダイナミクスをアト秒精度の超精密・時間分解ラムゼー干渉法によって観測・制御することに成功した(Nature Commun. 7, 13449 (2016); Acc. Chem. Res. 51, 1174 (2018))。この実験結果を、Strasbourg大学のPupillo教授が主導する理論グループと共同して開発した長距離イジングモデルに基づく新しい理論モデル(Phys. Rev. A 94, 053607 (2016))で解析した結果、少なくとも40原子以上に渡って広がった多体波動関数を実現されていることが明らかになった。この概念的に新しい研究は、米科学誌サイエンスや英国物理学会 IOP のハイライト記事を始め、欧米の数多くのニュースメディアに大きく取り上げられた。国内でもNHKテレビのニュースや多くの新聞各紙で大きく報道されるなど注目を集めた。また、本成果によって、研究代表者の大森が、Innsbruck大学の量子光学・量子情報研究所(IQOQI)、フランスの光学研究所(Institut d'Optique)、米国の「光と物質の量子制御に関するゴードン研究会議(GRC on Quantum Control of Light & Matter)」、フランスのLes Houches物理学校(École de Physique des Houches)、米国のMIT-Harvard極低温原子センター(CUA)、ドイツのMax Planck光科学研究所、英国のOxford大学Clarendon研究所、米国の共同量子研究所(JQI)、ドイツのMax Planck量子光学研究所、デンマークのAarhus大学量子光学量子物質センター(CQOM)など量子物理学・量子情報科学・量子制御などの分野で世界を代表する研究機関や国際会議に次々と招待されるなど、強相関量子多体系の超高速ダイナミクスを解明し制御するための新たなプラットフォームとして世界的に注目された。上記のゴードン研究会議では、大森が2019年会議の副議長(2021年会議の議長)にも選出されている。以上の成果は、研究代表者・大森の松尾財団宅間宏記念学術賞(2017年)および文部科学大臣表彰・科学技術賞(2018年)に繋がった。

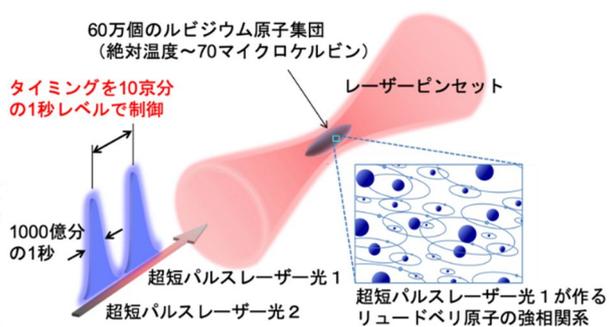


図1. 超高速量子シミュレータ・プロトタイプ。

図2. 超高速量子シミュレータ・標準ハードウェアの概念図。経産省ものづくり白書2018年度版より転載。

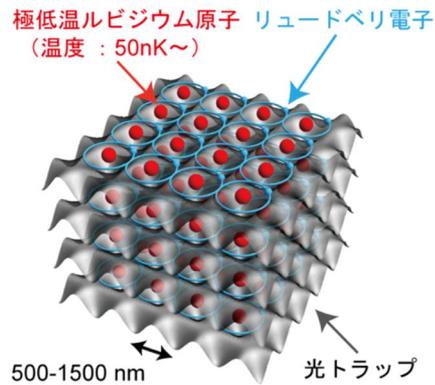


図2. 超高速量子シミュレータ・標準ハードウェアの概念図。経産省ものづくり白書2018年度版より転載。

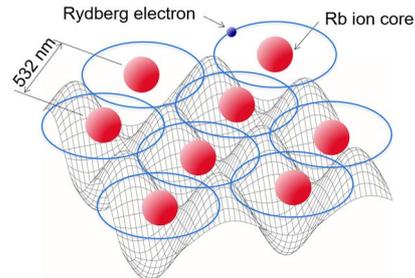


図3. 金属状の量子気体の模式図

(2) 光格子を用いた標準ハードウェア(2G 実験系)の開発

原子が乱雑に空間分布した上記のプロトタイプをアップグレードするための新たな実験装置を開発し、真空容器内で生成したRb原子のボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)を光格子トラップに導入することで、極低温Rb原子が532nm間隔で規則正しく3次元立方格子状に配列されたモット絶縁体を生成することに成功した。このモット絶縁体をピコ秒パルスレーザーでリユードベリ準位に励起して実現される「リユードベリ原子結晶」(2G 実験系)は、われわれ独自の手法によって世界で初めて可能となった新たな物質相である(図2)。

隣り合うリユードベリ電子軌道が重なり合うように励起することで、固体の金属のように隣り合った原子の電子同士が重なり合う新物質「金属状の量子気体(リユードベリ金属)」を世界で初めて創り出すことに成功した(図3; Phys. Rev. Lett. 124, 253201 (2020))。原子を電子に見立てる従来の量子シミュレータとは一線を画す、電子を電子そのものでシミュレートすることのできる革新的な量子シミュレーション・プラットフォームとして期待される。この成果は日米欧等、世界中の50以上の新聞・ニュースメディアで大々的に報道され社会的にも注目を集めた。

(3) リユードベリ金属モードの量子シミュレーション

超高速量子シミュレータをリユードベリ金属モードで動作させれば、従来の量子シミュレータのように電子を中性原子で代用する代わりに、電子そのもので固体中の多体電子ダイナミクスをシミュレートできるようになると期待される。このような金属モードのシミュレーションを目指して、Oxford大学のDieter Jaksch教授(量子多体物理・量子情報科学; 冷却原子量子シミュレータの発案者)と分子研の江原正博教授(量子化学計算)という各々の分野で国際的に活躍する理論家との緊密な連携のもとに、リユードベリ金属状態の可視化とモデル化を進めた(論文準備中)。これは、量子シミュレータ開発と量子化学が連携する世界で初めての試みである。

(4) 読み出しインターフェースの開発

超高速量子シミュレータの読み出しインターフェースであるアト秒精度の時間分解ラムゼー干渉法において、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 (Phys. Rev. Lett. **121**, 173201 (2018)) (図 4)。このインターフェースを用いて、リュドベリ原子結晶 (2G 実験系) の 1 フェムト秒周期の超高速多体電子ダイナミクスをアト秒精度で観測することに成功した (論文投稿準備中)。

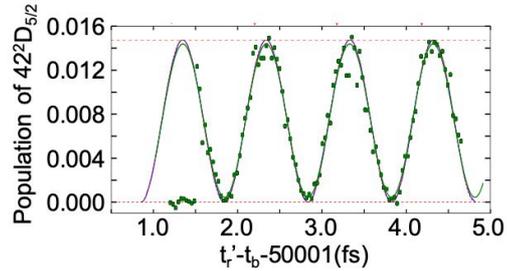


図 4. 超高速量子シミュレータの読み出しインターフェース。世界最高レベルの確度に相当するほぼ 100%の干渉コントラストを達成した。

(5) 標準ハードウェア (2G 実験系) の動作検証

光格子を用いた上記の 2G 実験系の動作検証を進めた。規則配列した 3 万個の ^{87}Rb 原子をリュドベリ状態へ励起し、多体電子波束のダイナミクスをアト秒精度の時間分解ラムゼー干渉によって観測することに成功した (図 5)。その結果、長距離リュドベリ相互作用によって干渉稿のコントラストと位相がピコ秒スケールで高速に時間変化しており、平均場近似では全く説明できないことが明らかになった。このピコ秒ダイナミクスは多体電子相関によるものと理解できる (論文投稿準備中)。

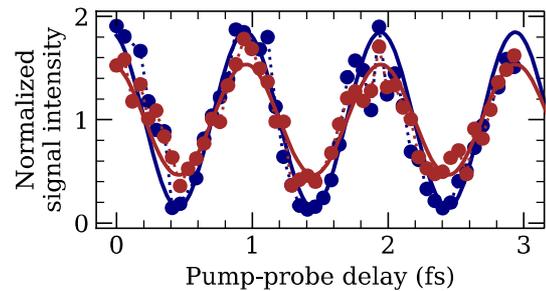


図 5. リュドベリ原子結晶 (赤丸) と参照用の低密度原子集団 (青丸) の電子干渉稿

同様に隣接するリュドベリ原子の電子軌道が重なる全く新しい物質相である「金属状態の量子気体 (リュドベリ金属)」に対しても明瞭な電子干渉稿を観測することに成功した。このように、主量子数を適切に選択し、相互作用の性質・強度を広範囲に調節することによって、「イジング模型モード」「長距離イジング模型モード」「リュドベリ金属モード」など様々なモードでの動作が可能であることが確認された。

(6) 光ピンセットを用いた任意原子配列ハードウェア (3G 実験系) の開発

分子研・大森グループでは、HPK グループと連携し、原子配列の任意制御を可能とする超高速量子シミュレータ装置の開発を行った。HPK グループが開発した空間光変調器 (SLM) を用いた「ホログラフィック原子トラップ技術」を適用するため、特殊形状の真空チャンバーや市販品レベルとは一線を画した大きな作動距離を持つ高開口数 (0.75) 対物レンズを設計するなど独自の装置開発を行い、同時に HPK グループでは同装置専用の光学薄膜や SLM を開発し光学特性面から装置開発をサポートした。これらを統合し、世界最大規模である 800 サイトのトラップを生成し 400 個程度の原子をトラップすることが可能な任意配列型原子トラップを構築することに成功した。さらに、ランダムな場所に捕捉された原子の位置を蛍光観測により特定し、音響光学偏向器で制御された二次元的に移動可能な動的ピンセットで再配列させることで、欠陥の無い所望の原子配列を実現した (図 6)。この任意配列型原子トラップ中の原子を用いて、ピコ秒パルスレーザーによるリュドベリ励起を行い、アト秒精度で時間間隔を制御した 2 発のパルスを使った 1.6 フェムト秒周期のラムゼー干渉実験において世界で初めて「単一原子中の単一電子の量子干渉の読み出し」に成功した。また同様の手法を用いて、電子を 2 つの異なる軌道角運動量を持つリュドベリ状態の重ね合わせ状態へと励起することで、世界で初めて「単一原子中の単一電子の波束運動」を観測することに成功した。さらに、上記の 1.6 フェムト秒周期の単一電子干渉が、リュドベリ原子間の距離とリュドベリ準位に依存して明瞭に変調されることを確認した (論文準備中)。また、光ピンセットを用いた手法では世界最短となる約 1 ミクロン間隔の原子対を実現することにも成功している。これらは、観測性および制御性において革新的な超高速量子シミュレーションが実現可能であることを示す結果である。

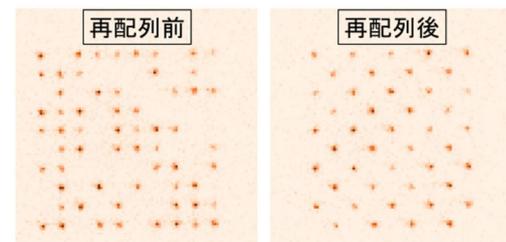


図 6. 動的ピンセットを用いた原子の再配列

(7) 任意原子配列ハードウェア (3G 実験系) の乱雑系動作モードへの拡張

HPK グループでは、乱雑系の量子シミュレーションを実現するために必要不可欠である「再現かつ制御可能なランダム光パターンを生成する技術: フォトニック疑似乱数発生器」の原理を確立した。ランダムな光パターンをホログラムにより生成する技術として、これまでランダムパターンの強度統計分布のみを制御可能な手法が知られていたが、今回新たに、実用レベルで強度統計分布と空間相関構造の両方を自在に制御可能な手法を、本プロジェクトにおいて世界で初めて確立した。このアプローチによって、原子配列パターンおよびランダムパターン生成が共通のホログラムパターン設計技術で実現可能となり、プロジェクト遂行過程における二つのホログラム技術開発を統合することができた。さらに、分子研グループの任意原子配列ハードウェア

(3G 実験系)において、本技術で生成されたランダムパターンによる原子捕捉が可能であることを実証し、乱雑系の超高速量子シミュレーションに対応した動作モードへの拡張に成功した。

(8) 世界最小・任意原子配列；新原理に基づく高精細ホログラム設計手法の開発

強相関状態の実現には、原子間距離がサブミクロン領域に達する高精細・光パターンが要求される。HPK グループでは、高精細パターン生成に対応した新規ホログラム設計手法を確立した。超高速量子シミュレータと同等の光学条件(波長 820 nm, 集光対物レンズ開口数 0.75)のもとで、設計されたホログラムから原子捕捉パターンを再生、焦点面上の再生像を対向観察し、世界最小となる 0.96 μm の微細配列間隔の実現を確認した(図7)。観測された原子捕捉パターンは、各点のサイズ縮小や分離の向上も確認されるなど、精密な原子配列制御が要求される応用面での優位性を示しており、今後の冷却原子捕捉におけるスタンダードとなる可能性を秘めている。この新規ホログラム設計手法は、相当の計算リソースを必要とする反面、回折限界付近でも再現度の高い光パターンを実現できるほか、設計条件の自由度および計算安定性の向上などの効果を持っている。これらはホログラム設計全般において好ましい特性であり、原子トラップに限らず光加工技術やレーザー走査顕微鏡技術などへの応用も期待される。

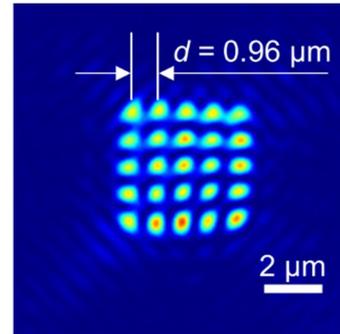


図7. 新規ホログラム設計法による世界最小0.96 μm 間隔のホログラム再生像。同一光学条件(光波長 820 nm、対物レンズ開口数 0.75)での結果を比較。

(9) リモート実験システムの構築

以上の3G 実験系の遠隔操作を可能にするリモート実験システムを構築した。図6に挙げた成果はこのリモート実験システムで得られたものである。将来のクラウドサービスのために不可欠な基盤技術であり、今後の我が国の量子技術戦略にとって重要な意義を持っている。

(10) 積極的な特許取得戦略

以上の研究進捗を反映して、5件の特許出願(国内3件、米国2件)を完了した。このうち、2件の特許権を確定した(米国2020年11月3日；日本2021年4月27日)。これらの特許2件の請求項は、近年主要各国で急速に存在感を増している冷却原子型・量子シミュレータおよび量子コンピュータの基本構成をほぼ網羅しており、今後の我が国の量子技術戦略にとって極めて重要な意義を持っている。

(11) 研究成果の総括と今後の展望

最大の目的であった「光トラップ中の極低温 Rb 原子集団とアト秒精度のコヒーレント制御を組み合わせた超高速量子シミュレータの開発」については、当初の目的を十二分に達成することができた。具体的には、まず、光双極子トラップ中で乱雑に空間分布した極低温 Rb 原子集団をピコ秒パルスレーザーで励起する独自の手法によって強相関リユードベリ原子集団を創り出し、超高速量子シミュレータのプロトタイプ(1G 実験系)を開発した(成果(1))。さらに、このプロトタイプを光格子中で規則正しく3次元立方格子状に配列された「リユードベリ原子結晶」へと拡張し、標準ハードウェア(2G 実験系)を完成させた(成果(2)(4))。これらの1G および2G 実験系に量子格子模型を実装し、多体電子ダイナミクスの超高速量子シミュレーションを実行した(成果(1)(5))。2G 実験系では、隣り合った原子のリユードベリ電子軌道が重なり合うように励起することで、固体の金属のように隣り合った原子の電子同士が重なり合う新物質「金属状の量子気体(リユードベリ金属)」を世界で初めて創り出すことに成功した(成果(2)(3)(5))。原子を電子に見立てる従来の量子シミュレータとは一線を画す、電子を電子そのものでシミュレートすることのできる革新的な量子シミュレーション・プラットフォームとして世界的に期待されている(米国 NIST ウェブサイトなど日米欧を始め世界中の50以上の新聞・ニュースメディアで大々的に報道された)。さらに2G 実験系の発展型として、光ピンセットを用いた任意原子配列ハードウェア(3G 実験系)を完成させた(成果(6))。3G 実験系は顕微機能を有しており、ミクロン間隔で任意配列された1個1個の原子の中の1個1個の電子の運動をアト秒精度で観測できる極限性能の量子シミュレータである。これによって多体波動関数の時空間発展の観測が可能になった。この過程で、光加工技術やレーザー走査顕微鏡技術など他分野への応用も期待される新原理の高精細ホログラム設計手法や、将来のクラウドサービスに有効なりモート実験システムを確立するなど、当初目標を超える成果も得られた(成果(8)(9))。

また、「フォトリック疑似乱数発生器」を開発し3G 実験系に適用することによって、プログラマブルな不規則パターンで原子をトラップする技術を確立した。これによって、第2の目的であった「より現実的な乱雑系の超高速量子シミュレーションに対応した動作モードへの拡張」も達成できた(成果(7))。

当初の目的の一つであった「量子-古典境界の探索」については、超高速量子シミュレータ中の数十以上の原子に非局在化した多体波動関数を創り出し、物理的な本質を明らかにするとともに、その時間発展をアト秒精度で観測・制御する技術を確立した(成果(1)(2)(3)(4)(5))。またこの非局在化した多体波動関数に乱雑さが与える影響を探索する装置も完成させた(成果(6)(7))。現時点で、量子-古典境界の解明には至っていないが、今後これらの革新的な装置・手法を用いて、乱雑さが関与する多体波動関数の性質を詳細に観察することによって量子-古典境界のより良い理解を追求したい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 素川靖司, 富田隆文, Sylvain de Leseleuc, 安藤太郎, 武井宣幸, 大森賢治	4. 巻 56
2. 論文標題 アト秒精度の極低温・超高速量子シミュレータ	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 固体物理	6. 最初と最後の頁 243 - 256
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 瀧口優	4. 巻 25
2. 論文標題 位相変調型液晶空間光変調器と点像分布関数制御工学への応用	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本液晶学会誌	6. 最初と最後の頁 105 - 112
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 M. Mizoguchi, Y. Zhang, M. Kunimi, A. Tanaka, S. Takeda, N. Takei, V. Bharti, K. Koyasu, T. Kishimoto, D. Jaksch, A. Glaetzle, M. Kiffner, G. Masella, G. Pupillo, M. Weidemüller, and K. Ohmori	4. 巻 124
2. 論文標題 Ultrafast Creation of Overlapping Rydberg Electrons in an Atomic BEC and Mott-Insulator Lattice	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 253201
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.124.253201	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 ChunMei Liu, Joern Manz, Kenji Ohmori, Christian Sommer, Nobuyuki Takei, Jean Christophe Tremblay, and Yichi Zhang	4. 巻 121
2. 論文標題 Attosecond Control of Restoration of Electronic Structure Symmetry	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 173201
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.121.173201	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hiroyuki Katsuki, Nobuyuki Takei, Christian Sommer, and Kenji Ohmori	4. 巻 51
2. 論文標題 Ultrafast Coherent Control of Condensed Matter with Attosecond Precision	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Accounts of Chemical Research	6. 最初と最後の頁 1174 - 1184
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.accounts.7b00641	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nobuyuki Takei, Christian Sommer, Claudiu Genes, Guido Pupillo, Haruka Goto, Kuniaki Koyasu, Hisahi Chiba, Matthias Weidemüller, and Kenji Ohmori	4. 巻 7
2. 論文標題 Direct observation of ultrafast many-body electron dynamics in an ultracold Rydberg gas	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 13449
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/ncomms13449	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Christian Sommer, Guido Pupillo, Nobuyuki Takei, Shuntaro Takeda, Akira Tanaka, Kenji Ohmori, and Claudiu Genes	4. 巻 94
2. 論文標題 Time-domain Ramsey interferometry with interacting Rydberg atoms	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 53607
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.94.053607	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計133件 (うち招待講演 67件 / うち国際学会 70件)

1. 発表者名 大森賢治
2. 発表標題 Ultrafast and Ultracold Quantum Simulator with Attosecond Precision
3. 学会等名 15th Femtochemistry Conference (FEMT015), Berlin, Germany (COVID-19パンデミックのため2023年に延期) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大森賢治
2. 発表標題 Ultrafast and Ultracold Quantum Simulator with Attosecond Precision
3. 学会等名 DAMOP 2021 (52nd Annual Meeting of the American Physical Society's Division of Atomic, Molecular and Optical Physics), Online (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大森賢治
2. 発表標題 Ultrafast and Ultracold Quantum Simulator with Attosecond Precision
3. 学会等名 EU FET Project COPAC Symposium "Parallel Computing Quantum Devices", Online (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大森賢治
2. 発表標題 Ultrafast Quantum Simulator with Attosecond Precision at Ultracold Temperatures
3. 学会等名 Fundamental Sciences and Quantum Technologies Using Atomic Systems (FSQT 2020), Online (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大森賢治
2. 発表標題 Ultrafast Quantum Simulator with Attosecond Precision at Ultracold Temperatures
3. 学会等名 India-Japan Webinar on Quantum Technologies (Organized by the Embassy of India), Online (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大森賢治
2. 発表標題 Ultrafast Many-Body Electron Dynamics in an Ultracold Atomic BEC and Mott Insulator Lattice
3. 学会等名 Topical Conference on Quantum Computing (TCQC) 2019, Kyoto Brighton Hotel, Kyoto (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大森賢治
2. 発表標題 Ultrafast Many-Body Electron Dynamics in an Ultracold Atomic BEC and Mott Insulator Lattice
3. 学会等名 Annual Conference Series "Frontiers in Synthetic Quantum Systems", Tianping Hotel, Shanghai, China (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大森賢治
2. 発表標題 Ultrafast Many-Body Electron Dynamics in an Ultracold Atomic BEC and Mott Insulator Lattice
3. 学会等名 The Conference "Quantum Computing in Near Term", Universitaet Wien, Austria (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大森賢治
2. 発表標題 Japan's Quantum-Technology Policy and Its International Strategy
3. 学会等名 Quantum Flagship Event: "Exploring and Making Quantum Technology", Aalto University, Helsinki, Finland (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大森賢治
2. 発表標題 Ultrafast Many-Body Electron Dynamics in a Strongly Correlated Ultracold Rydberg Gas
3. 学会等名 The 14th Femtochemistry Conference, Jin Jiang Hotel, Shanghai, China (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大森賢治
2. 発表標題 Ultrafast Many-Body Electron Dynamics in a Strongly Correlated Ultracold Rydberg Gas
3. 学会等名 Physics and Astronomy (P&A) AMO Seminar, Rice University, Houston, USA (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大森賢治
2. 発表標題 Ultrafast Many-Body Electron Dynamics in a Strongly Correlated Ultracold Rydberg Gas
3. 学会等名 Quantum Dynamics and Spectroscopy in Condensed-Phase Materials and Bio-Systems, Telluride Science Research Center (TSRC), Telluride, USA (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大森賢治
2. 発表標題 Ultrafast Many-Body Electron Dynamics in a Strongly Correlated Ultracold Rydberg Gas
3. 学会等名 International Symposium: Highly-Excited States and Non-Covalent Interactions, The University of Manchester, UK (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大森賢治
2. 発表標題 Ultrafast Many-Body Electron Dynamics in a Strongly Correlated Ultracold Rydberg Gas
3. 学会等名 The 4th International Workshop on Rydberg Atoms and Molecules, Hangzhou, China (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大森賢治
2. 発表標題 Ultrafast Many-Body Electron Dynamics in a Strongly Correlated Ultracold Rydberg Gas
3. 学会等名 IAS Workshop "Quantum Simulation of Novel Phenomena with Ultracold Atoms", The Hong Kong University of Science and Technology, China (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大森賢治
2. 発表標題 Ultrafast Many-Body Electron Dynamics in a Strongly Correlated Ultracold Rydberg Gas
3. 学会等名 Center for Quantum Optics and Quantum Matter (CQOM) Colloquium, Aarhus University, Denmark (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大森賢治
2. 発表標題 Ultrafast Many-Body Electron Dynamics in a Strongly Correlated Ultracold Rydberg Gas
3. 学会等名 Max Planck Institute of Quantum Optics (MPQ) Seminar, Garching, Germany (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大森賢治
2. 発表標題 Ultrafast Many-Body Electron Dynamics in a Strongly Correlated Ultracold Rydberg Gas
3. 学会等名 Joint Quantum Institute (JQI) Seminar, Maryland, USA (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大森賢治
2. 発表標題 Ultrafast Many-Body Electron Dynamics in a Strongly Correlated Ultracold Rydberg Gas
3. 学会等名 Atomic and Laser Physics (ALP) Seminar, University of Oxford, UK (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大森賢治
2. 発表標題 Ultrafast Many-Body Electron Dynamics in a Strongly Correlated Ultracold Rydberg Gas
3. 学会等名 Max Planck Institute for the Science of Light Seminar, Erlangen, Germany (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大森賢治
2. 発表標題 Ultrafast Many-Body Electron Dynamics in a Strongly Correlated Ultracold Rydberg Gas
3. 学会等名 MIT-Harvard Center for Ultracold Atoms (CUA) Seminar, Harvard University, USA (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大森賢治
2. 発表標題 Ultrafast Many-Body Electron Dynamics in a Strongly Correlated Ultracold Rydberg Gas
3. 学会等名 Gordon Research Conference on "Quantum Control of Light and Matter", Mount Holyoke College, South Hadley, MA, USA (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大森賢治
2. 発表標題 Ultrafast Many-Body Electron Dynamics in a Strongly Correlated Ultracold Rydberg Gas
3. 学会等名 Institut d'Optique Seminar, Palaiseau, France (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大森賢治
2. 発表標題 Ultrafast Many-Body Electron Dynamics in a Strongly Correlated Ultracold Rydberg Gas
3. 学会等名 Les Houches / Telluride Workshop on "Quantum Dynamics and Spectroscopy of Functional Molecular Materials and Biological Photosystems", Les Houches, France (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大森賢治
2. 発表標題 Ultrafast Many-Body Electron Dynamics in a Strongly Correlated Ultracold Rydberg Gas
3. 学会等名 Institute for Quantum Optics and Quantum Information (IQOQI) Seminar, University of Innsbruck, Austria (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大森賢治
2. 発表標題 Many-Body Physics: The Holy Grail of Modern Sciences and Technologies
3. 学会等名 Invited Lecture, State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optic Devices, Shanxi University, China (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 大森賢治
2. 発表標題 Addressing Quantum Many-Body Dynamics by Ultrafast Coherent Control with Attosecond Precision
3. 学会等名 CQD-IMS Collaborative Meeting "Rydberg Quantum Matter", Heidelberg, Germany (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計5件

産業財産権の名称 QUANTUM SIMULATOR AND QUANTUM SIMULATION METHOD	発明者 酒井寛人, 大森賢治, 安藤太郎, 武井宣幸, 他4名	権利者 浜松ホトニクス 株式会社、自然 科学研究機構
産業財産権の種類、番号 特許、Pub. No. US 2018/0292786 A1	出願年 2018年	国内・外国の別 外国

産業財産権の名称 量子シミュレータおよび量子シミュレーション方法	発明者 酒井寛人, 大森賢治, 安藤太郎, 武井宣幸, 他4名	権利者 浜松ホトニクス 株式会社、自然 科学研究機構
産業財産権の種類、番号 特許、特開 2018-180179	出願年 2017年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 QUANTUM SIMULATOR AND QUANTUM SIMULATION METHOD	発明者 酒井寛人, 大森賢治, 安藤太郎, 武井宣幸, 他4名	権利者 浜松ホトニクス 株式会社、自然 科学研究機構
産業財産権の種類、番号 特許、Pub. No. US 2021/0011430 A1	出願年 2020年	国内・外国の別 外国

産業財産権の名称 量子シミュレータおよび量子シミュレーション方法	発明者 酒井寛人, 大森賢治, 安藤太郎, 他5名	権利者 浜松ホトニクス 株式会社、自然 科学研究機構
産業財産権の種類、番号 特許、特開 2022-40896	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 量子シミュレータおよび量子シミュレーション方法	発明者 酒井寛人, 大森賢治, 安藤太郎, 他5名	権利者 浜松ホトニクス 株式会社、自然 科学研究機構
産業財産権の種類、番号 特許、特開 2022-40884	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計2件

産業財産権の名称 量子シミュレータおよび量子シミュレーション方法	発明者 酒井寛人, 大森賢治, 安藤太郎, 武井宣幸, 他4名	権利者 浜松ホトニクス 株式会社、自然 科学研究機構
産業財産権の種類、番号 特許、特許第6875680号	取得年 2021年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 QUANTUM SIMULATOR AND QUANTUM SIMULATION METHOD	発明者 酒井寛人, 大森賢治, 安藤太郎, 武井宣幸, 他4名	権利者 浜松ホトニクス 株式会社、自然 科学研究機構
産業財産権の種類、番号 特許、US 10,824,114 B2	取得年 2020年	国内・外国の別 外国

〔その他〕

分子科学研究所大森グループホームページ https://groups.ims.ac.jp/organization/ohmori_g/index.html
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	豊田 晴義 (Toyoda Haruyoshi) (80393940)	浜松ホトニクス株式会社・中央研究所・副所長 (93801)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 協 力 者	J a k s c h D i e t e r (Jaksch Dieter)	オックスフォード大学	
研究 協 力 者	P u p i l l o G u i d o (Pupillo Guido)	ストラスブール大学	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	Zoller Peter (Zoller Peter)	インスブルック大学	
研究協力者	Lechner Wolfgang (Lechner Wolfgang)	インスブルック大学	
研究協力者	千葉 寿 (Chiba Hisashi)	岩手大学	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
フランス	Strasbourg大学			
英国	Oxford大学			
ドイツ	Heidelberg大学			
オーストリア	Innsbruck大学			