

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域
「先端光源を駆使した光科学・光技術の融合展開」
研究課題
「アト秒精度の凝縮系コヒーレント制御」

研究終了報告書

研究期間 平成22年10月～平成28年3月

研究代表者：大森賢治
(自然科学研究機構・分子科学研究所
研究主幹/教授)

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

物質の波動関数の干渉を光で制御する技術をコヒーレント制御と呼ぶ。その応用は、量子情報処理や結合選択的な化学反応制御といった先端テクノロジーの開発に結びつくだけでなく、量子力学的な世界観の検証においても有用である。研究代表者が率いる分子研大森グループは、本 CREST 研究開始以前に、独自に開発した超高安定光干渉計(アト秒位相変調器: **Attosecond Phase Modulator (APM)**)によってアト秒精度で制御されたレーザー電場の位相情報を気相孤立分子の電子・振動波動関数に完全に転写するという画期的な方法を用いて、アト秒ピコメートル精度の時空間コヒーレント制御法の開発に成功していた。さらにこの技術を用いて、世界最速レベルのスーパーコンピュータの 1000 倍以上の速さでフーリエ変換を実行する分子コンピュータの開発に成功していた。これらの成果は、気相の孤立原子分子を対象としたコヒーレント制御の究極である一方、分子コンピュータの固体デバイス化や量子-古典境界の謎の解明を目指すには、凝縮系への展開が求められていた。

凝縮系は、多数の電子と原子核が協奏する多体系である。近年、この複雑な多体問題を人工的な実験系で実現し、ここでの模擬実験によって解明しようとするアプローチが模索されている。このような人工多体系は「量子シミュレーター」と呼ばれている。本 CREST 研究では、我々の極限的なコヒーレント制御と極低温原子集団を組み合わせた全く新しい量子シミュレーターを開発し、そこで得られた量子多体系の観測制御スキームを実在のバルク固体に応用することによって、凝縮系のコヒーレント制御を格段に発展させる方法論の確立を目指して来た。

研究チームは、量子シミュレーター班(分子研大森グループ)、バルク固体班(分子研大森グループ・東工大中村グループ)、理論班(分子研大森グループ・大阪府立大萱沼グループ)から構成されている。なお、萱沼グループは平成 25 年 4 月より中村グループ内に移動した。

量子シミュレーター班は、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を凝縮系のモデルとして用い、そこでの波動関数の時間発展を追求する世界に類を見ない「超高速量子シミュレーター」の開発を進めてきた。本開発は、前例のない発想と実験装置・手法に基づくものであり、さらに観測結果の解釈のために新しい理論モデルの構築を必要としたため、予想し得ない数々の問題点を一から自力で解決して行く必要があったが、昨年度ついにそれらの問題点をすべて克服し、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。ここでは、これまでの極低温リュ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、広帯域のパルスレーザーを導入するという独自の手法によって、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電子ダイナミクスをアト秒精度で観測・制御することに成功している。この成果は今年度始めに論文にまとめ arXiv 上で公表するとともに(arXiv:1504.03635 (2015).)、国際的な科学誌に投稿済である。また既にその強力な波及効果が世界的に浸透しつつあり、例えば昨年から今年にかけて、原子物理 Gordon 会議など欧米を中心とした主要国際会議において 10 件の招待講演を依頼されている。また、このプロトタイプを光格子に導入し多体波動関数の時空間発展を観測する為に必要な Rb 原子のボーズ・アインシュタイン凝縮(BEC)の準備と新たな装置開発も完了しており、既に稼働を開始している。この新装置では外部からの雑音が時空間発展に与える影響を調べる事によって、量子-古典境界における熱揺らぎの影響を検証する実験も予定されている。この際に熱雑音をモデル化する為に必要な「非共鳴の赤外高強度フェムト秒レーザーパルスで波動関数に擾乱を加える技術」の開発にも成功している(Nature Physics 7, 383 (2011).)。以上の成果は大森グループにおける実験・理論研究によって得られた。

この超高速量子シミュレーター・プロトタイプの完成を契機に、量子シミュレーター班とバルク固体班の連携研究も一気に進展した。例えば、バルク固体班による GaAs 単結晶のコヒーレント制御実験において、「フォノン・プラズモン結合モード(LOPC モード)のコヒーレンス寿命は励起強度が高いほど短くなる」という極めて興味深い傾向が観測された(Phys. Rev. B 86, 235145 (2012).)。この原因として、励起されるキャリア電子密度が高くなる事によって、プラズモン(電子・イオンの集団振動)の多体波動関数の位相緩和が加速されコヒーレンス寿命が短くなることが

考えられる。この仮説を検証する為に、上記の超高速量子シミュレーター・プロトタイプを用いて、リユードベリ状態のポピュレーションが多体リユードベリ電子波動関数のコヒーレンス寿命にどのような影響を与えるかを詳細に検証した。その結果、固体中のキャリア電子密度に相当するリユードベリ電子状態のポピュレーションが高いほどコヒーレンスの減衰が加速される様子が観測された。これを新たに開発した理論モデルで解析したところ、ポピュレーションが上がる事によって多体相関が強くなり、その結果、波動関数の位相緩和が加速される事が見いだされた (arXiv:1504.03635 (2015).)。そこで、この検証結果をバルク固体班にフィードバックし、GaAs 単結晶における電子コヒーレンス寿命のキャリア電子密度依存性の測定を開始した。現在、低温での詳細な測定を進めている。本連携成果は、研究開始当初思い描いていた量子シミュレーター班とバルク固体班の双方向のフィードバックに基づく全く新しい研究形態が、極めて複雑な量子多体問題を解明する上で非常に有効であることを実証する事が出来た点で意義深い。以上の成果は大森グループと中村グループの連携によって得られた。

バルク固体班では、その他にも超高速量子シミュレーターで検証すべき新現象の探索を進めて来たが、その途上で、様々な固体結晶中で非局在化した分子振動や格子振動およびそれらが電子と結合した状態の超高速量子多体ダイナミクスの観測と制御にも成功している。中でも、位相変調を制御した二つのフェムト秒レーザーパルスを APM によってアト秒精度のタイミングで重ね合わせることによって、ビスマス単結晶中の原子の超高速2次元運動を制御し 100 兆分の 1 秒単位で画像化した成果は、様々な凝縮系に適用することができる普遍的な方法論として注目されている (Nature Communications 4, 2801 (2013).)。以上の成果は大森グループと中村グループの共同実験と萱沼グループの理論サポートによって得られた。

今後、本研究で確立した超高速量子シミュレーターとバルク固体実験の双方向フィードバックに基づく新しい研究形態によって、凝縮系のコヒーレント制御が格段に進展すると期待される。また、空間的に広がった多体波動関数が外部からの雑音によってどのように局在化していくのかを超高速量子シミュレーターで詳細に追跡する事によって、量子-古典境界に関するより良い理解が進む事が期待される。

(2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

1. ナノより小さい1分子コンピューター内の情報書き換えに成功ー分子1個で任意の超高速演算を可能にする新しい光技術ー

“Strong-laser-induced quantum interference”, H. Goto, H. Katsuki, H. Ibrahim, H. Chiba, and K. Ohmori, Nature Physics 7, 383-385 (2011).

被引用件数:25 件

概要:従来は干渉しないと考えられていた分子の中の異なったエネルギー状態の波動関数が、高強度のフェムト秒赤外レーザーパルス照射によって混じり合い干渉するという、全く新しい物理現象を発見した。さらに、この干渉現象を用いて、分子内の複数の波動関数の強度を変化させることで、それらの強度の組み合わせとして書き込まれた情報を外部から書き換えることに成功した。この成果は、分子コンピューターで任意の論理演算を実行するための基盤技術として期待されるほか、凝縮系で乱された波動関数を復元するための基盤技術の開発にも役立つと期待される。

2. 固体中の原子の超高速運動を 100 兆分の 1 秒単位で画像化して制御する新しい光技術
“All optical control and visualization of ultrafast two-dimensional atomic motions in a single crystal of bismuth”, H. Katsuki *et al.*, Nature Communications 4, 2801 (2013).

被引用件数:7 件

概要:位相変調を制御した二つのフェムト秒レーザーパルスをアト秒精度のタイミングで重ね合わせるによって、THz 領域の光電場振動を制御することができる。この THz 振動を用いて、ビスマス結晶中の直交する二つの原子運動を独立に制御しコヒーレントに重ね合わせるによって、結晶中の原子の 2 次元運動を制御することに成功した。さらに、この2次元運動に起因

する過渡反射率測定と密度汎関数法による反射率変化の理論計算を組み合わせることによって、結晶中の原子の2次元運動を100兆分の1秒単位で画像化することに成功した。この制御／画像化スキームは、「あらゆる物理系の2次元運動は直交した二つの1次元運動に分解することができる」というシンプル、堅固、かつ普遍的なコンセプトに基づいており、様々な凝縮系に適用することができる。

3. 強相関・極低温リュードベリ原子集団における超高速多体電子ダイナミクスをアト秒精度で観測・制御する新しい光技術

“Direct observation of ultrafast many-body electron dynamics in a strongly-correlated ultracold Rydberg gas”, N. Takei *et al.*, arXiv:1504.03635 (2015).

被引用件数:1件

概要:絶対零度付近までレーザー冷却した高密度リュードベリ原子集団を使って強相関量子多体系を創り出す新しい研究方法の開発に成功した。この「強相関・極低温リュードベリ原子集団」は、これまでの極低温リュ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、広帯域のパルスレーザーを導入するという全く新しい手法によって世界で初めて実現しており、桁違いの強相関状態を作り出すとともに、その1フェムト秒周期の超高速電子ダイナミクスをアト秒精度で観測・制御することが出来る。この新しい概念は、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を集めている。

< 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

1. 固体パラ水素中の非局在量子状態の超高速コヒーレント制御

“Optically engineered quantum interference of delocalized wave functions in a bulk solid: The example of solid para-hydrogen”, H. Katsuki, Y. Kayanuma, and K. Ohmori, Phys. Rev. B **88**, 014507 (2013).

被引用件数:3件

概要:固体パラ水素結晶中で非局在化したフレンケル型の分子振動状態をアト秒精度のタイミングで重ね合わせることによって、それらの量子力学的な干渉を1ナノ秒に渡ってはば完璧に制御することに成功した。我々は以前に、気相孤立分子の振動状態を利用して最速スパコンより1000倍以上速い1分子コンピューターの開発に成功しているが、本研究はこの分子コンピューターを固体中に保持し大規模化するための基盤技術開発として意義がある。

2. GaAs 中の LO フォノンと LO フォノンプラズモン結合モードのコヒーレント制御

“Delayed formation of coherent LO phonon-plasmon coupled modes in n- and p-type GaAs measured using a femtosecond coherent control technique”, J. Hu, O. V. Misochko, A. Goto, and K. G. Nakamura, Phys. Rev. B **86**, 235145 (2012).

被引用件数:2件

概要:フェムト秒レーザーパルス列を用いて、GaAs 内にコヒーレントに励起された LO フォノンおよび LO フォノンプラズモン結合モード (LOPC) の振動強度を制御することに成功した。特に、LOPC では振動振幅が小さくなるとコヒーレント時間が長くなる新しい現象が観測された。この結果は有効的なキャリア電子密度によってコヒーレンス時間が制御できる可能性を示唆するもので、プラズモニクスデバイスにおける超高速制御の基礎技術開発として意義がある。

3. トポロジカル絶縁体のフォノンダイナミクス計測

“Coherent optical phonons in Bi₂Se₃ single crystal measured via transient anisotropic reflectivity”, K. Norimatsu, J. Hu, A. Goto, K. Igarashi, T. Sasagawa, and K. G. Nakamura, Solid State Commun., **157**, 58-61 (2013).

被引用件数 4 件

概要:トポロジカル絶縁体である Bi₂Se₃ 単結晶のフォノンダイナミクスをフェムト秒時間分解過渡反射率計測により明らかにした。トポロジカル絶縁体は、表面にディラック

電子および純スピン流をもちスピントロニクス材料としての応用が期待されている物質である。本研究はトポロジカル絶縁体の電子およびスピンを超高速で制御するための基礎物性の整備として意義がある。

§ 2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

①「大森」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
大森 賢治	分子科学研究所	教授	H22.10～
武井 宣幸	同上	助教	H22.10～
Christian Sommer	同上	助教	H24.1～ H26.1 まで研究員。 H26.2 に助教に着任。
千葉 寿	岩手大学／ 分子科学研究所	技術職員	H22.10～
山上 由希子	分子科学研究所	研究支援員	H22.10～
Matthias Weidemüller	ドイツ・Heidelberg 大学	教授	H24.5～
Guido Pupillo	フランス・Strasbourg 大学	教授	H24.5～
Claudiu Genes	オーストリア・ Innsbruck 大学	独立上級研究員	H26.2～
後藤 悠	分子科学研究所	研究員	H27.4～
溝口 道栄	同上	修士課程学生	H27.4～
武田 俊太郎	同上	特任助教	H26.4～H27.3
中川 佳大	同上	博士課程学生	H22.10～H26.3
子安 邦明	同上	修士課程学生	H23.4～H26.3
上妻 幹旺	東京工業大学	准教授	H23.4～H23.8

研究項目

- ・凝縮系のアト秒コヒーレント制御

②「中村」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
中村 一隆	東京工業大学 応用セラミックス研究所	准教授	H22.10～
萱沼 洋輔	同上	産学官連携研究員 (特任教授)	H25.4～
北島 正弘	同上 H22.10～H25.3 の間は 防衛大学校教授として 参加	産学官連携 研究員	H25.4～

研究項目

- ・ バルク固体における量子コヒーレンスの探索と計測技術開発

③「萱沼」グループ (H25.3 まで)

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
萱沼 洋輔	大阪府立大学 21世紀科学研究機構	特認教授	H22.10～H25.3 H25.4 以降は中 村グループ
水本 義彦	同上	研究員	H23.4～H24.12

研究項目

- ・ 凝縮系のアト秒コヒーレント制御理論の構築

(2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

(2-1) 超高速量子シミュレーターに関する研究ネットワーク形成

極低温リユードベリ物理の権威であるドイツ・Heidelberg 大学の Matthias Weidemüller 教授、世界の量子情報科学を先導する新進気鋭の理論家であるフランス・Strasbourg 大学の Guido Pupillo 教授、およびオーストリア・Innsbruck 大学の Claudiu Genes 独立上級研究員は、本 CREST プロジェクトに大森グループのメンバーとして参加し、超高速量子シミュレーターについて大森グループと緊密な共同研究を行っている。またこの他に、極低温原子集団を用いた量子シミュレーターの発案者であるイギリス・Oxford 大学の理論家 Dieter Jaksch 教授および Martin Kiffner 博士研究員も超高速量子シミュレーターの開発プロジェクトの主要メンバーである。例えば、2014 年 1 月には、Oxford 大学において本 CREST 研究代表者の大森、Pupillo 教授、Jaksch 教授、Kiffner 博士が集まり、Jaksch 教授主催の研究打ち合わせ会を行った。その後も、これらの研究者と大森グループは、超高速量子シミュレーターの今後の研究展開について、相互訪問や Skype・Eメール等によって頻繁に研究打ち合わせを進めている。これに加えて、本 CREST 研究代表者の大森は、Heidelberg 大学客員教授および Strasbourg 大学客員教授としてドイツ・フランスに研究拠点を設け、ここを中心に Oxford 大学・Heidelberg 大学・Strasbourg 大学の間で超高速量子シミュレーターに関する国際研究拠点ネットワークの整備を精力的に進めている。この中で、今後の研究展開で特に重要と思われる、Strasbourg 大学の Guido Pupillo 教授と Oxford 大学の Dieter Jaksch 教授が超高速量子シミュレーターの開発プロジェクトに参加した経緯について以下に述べる。

Guido Pupillo 教授は極低温原子を用いた量子シミュレーターの理論的な研究で世界をリードする新進気鋭の若手研究者である。2005 年に米国の Maryland 大学で学位を取得した後に、量子コンピューターや量子シミュレーターを始めとする量子光学・量子情報科学の理論研究のメッカである Innsbruck 大学の Peter Zoller 教授グループで Zoller 教授の右腕として活躍し、2011 年に Habilitation を取得した。この間の目覚ましい成果によって、2012 年に若くして Strasbourg 大学の教授に抜擢された。その後も同分野を牽引する活躍を続けている。特に極低温リユードベリ原子を用いた量子シミュレーションの研究は同氏の代表作の一つであり(Pupillo *et al.*, Phys. Rev. Lett. **104**, 223002 (2010).)、同じく極低温リユードベリ原子を用いた超高速量子シミュレーターの開発において、観測結果を説明する理論モデルを構築する上でなくてはならない存在である。我々と Pupillo 教授とは 2012 年より緊密な共同研究を推進しており、既に「高密度極低温リユードベリ気体のアト秒コヒーレント制御」に関する画期的な論文(arXiv:1504.03635(2015).)を共同執筆し公表済みである。

一方、Dieter Jaksch 教授は、同じく Innsbruck 大学の Peter Zoller 教授の下で 1999 年に学位を取得した後に、Oxford 大学に講師として招かれ 2010 年より同大学物理学科の教授を務めている。1998 年に「光格子トラップ中の冷却原子集団を用いて Hubbard 模型をシミュレートする」と

いう画期的なアイデアを理論的に提唱し(Jaksch *et al.*, Phys. Rev. Lett. **81**, 3108 (1998).)、これが2002年にGarchingのMax-Planck量子光学研究所で実験的に実現されることによって近年の量子シミュレーター研究の歴史が始まった(Greiner *et al.*, Nature **415**, 39 (2002).)。その後も次々に興味深い物理現象の Hamiltonian を光格子中の極低温原子集団に実装するアイデアを提唱し、これらが実験的に証明されるという一連のサイクルでこれまでの量子シミュレーター研究は発達して来た。このように Jaksch 教授は、光トラップ中の極低温原子集団に Hamiltonian を実装するためのアイデアを考案する上で、世界に類を見ない傑出した才能を有している。同氏は、量子シミュレーターの次のステップを我々の超高速量子シミュレーターに定め、既にこのシミュレーターに実装すべき Hamiltonian の検討を精力的に進めている。

これらに加え、レーザー光の空間パターン整形に使用する 2 次元空間光位相変調器について、同デバイスの開発者である浜松ホトニクス社と緊密な共同研究を行っている。同社・中央研究所と変調器の動作仕様に関する全ての情報を共有し、必要に応じた改造の準備を進めている。

(2-2) 極低温分子に関する研究ネットワーク形成

超高速コヒーレント制御を用いた光会合実験について、そのスキームの提案者の一人であるドイツ・Kassel 大学の Christiane Koch 教授と協力して研究を進めている。

(2-3) バルク固体研究に関する研究ネットワーク形成

ドイツ・Kassel 大学の理論家 Martin Garcia 教授との連携により、コヒーレントフォノンにおける原子運動の解析を進めた。

東京工業大学の笹川崇男准教授のグループから新奇機能性材料(トポロジカル絶縁体、鉄系超伝導体)の提供をうけ、機能性物質の研究で連携を行っている。

§ 3 研究実施内容及び成果

3.1 凝縮系のアト秒コヒーレント制御(分子科学研究所 大森グループ)

(1) 研究実施内容及び成果

大森グループでは、独自に開発したアト秒精度の極限的な超高速コヒーレント制御と極低温原子集団を組み合わせた全く新しい量子シミュレーターを開発し、そこで得られた量子多体系の観測制御スキームを実在のバルク固体に応用することによって、凝縮系のコヒーレント制御を格段に発展させる方法論の確立を目指して来た。研究グループは量子シミュレーター部分を担当する量子シミュレーター班と、バルク固体部分を担当するバルク固体班、およびそれらを理論的にサポートする理論班から構成され、これらの研究班の双方向のフィードバックに基づく新しい研究形態の確立を目指してきた。

分子研大森グループは本研究課題の中核であり、量子シミュレーター班のすべての実験をここで遂行する他、バルク固体班においても、一部の測定技術の開発や予備実験を東工大の中村グループで行う他は、すべての重要な観測制御実験をここに集約した。また、超高速量子シミュレーターの開発に必要な新しい理論モデルの開発を行った。さらに、大森が本研究計画全体の統括を行った。

具体的な研究内容とその成果を以下に示す。

(a) 超高速原子シミュレーター実験

極低温 Rb 原子集団に超短パルスレーザーを照射し、各原子をリュードベリ状態に励起する。リュードベリ電子軌道の広がり原子間隔と同程度であれば、リュードベリ電子波動関数の時間発展に原子間の多体相互作用の影響が現れるはずである。この多体効果を「時間領域ラムゼー干渉法」で観測する。時間領域ラムゼー干渉法とは、APM によってアト秒精度で位相ロックされたレーザーパルス対をポンプ-プローブパルスとして用い、ポンプパルスが発生させた量子コヒーレンスの時間発展をプローブパルスが発生させた量子コヒーレンスとの干渉によって測定する手法である。多体相互作用の強度は、以下の3つの方法で調節できると期待される: 1) レーザー波長を変えることによってリュードベリ電子軌道の空間的な広がり(主量子数)を調節する; 2) レーザー強度を変えることによってリュードベリ状態のポピュレーションを調節する; 3) レーザーパルスを整形することによってリュードベリ電子波動関数の形状を調節する。

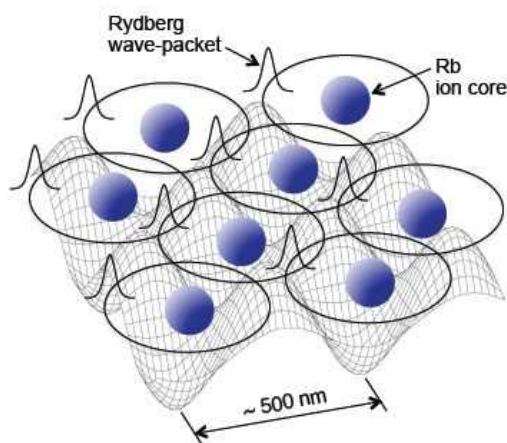


図 1: 超高速量子シミュレーターの概念図。リュードベリ電子軌道の空間広がりリュードベリ状態のポピュレーションを調節し、多体相互作用を制御・観測する。(K. Ohmori, Found. Phys. **44**, 813 (2014).)

(a-1) 強相関極低温リュードベリ気体における超高速多体電子ダイナミクスの観測と制御

光格子の格子間隔と同程度の平均原子間距離を持つ光双極子トラップ中の Rb 原子集団を用いて高密度の極低温リュードベリ原子集団を生成し、それら多数の原子が強く相互作用する様子を観測・制御することに成功した(arXiv:1504.03635 (2015).)。この多体相互作用は、ポンプ-プローブパルスを用いたアト秒精度の「時間領域ラムゼー干渉法」により、量子干渉信号におけるポンプ-プローブ間の遅延時間に依存した干渉コントラストの減少および位相シフトとして観測された(図 2)。時間領域ラムゼー干渉法とは、APM によってアト秒精度で位相ロックされたレーザーパルス対をポンプ-プローブパルスとして用い、ポンプパルスが発生させた量子コヒーレンスの時間発展をプローブパルスが発生させた量子コヒーレンスとの干渉によって測定する手法である。この観測結果は、二体相互作用のみを考慮した解析、および平均場近似モデルによる解析では説明できないことが明らかとなった。そこで、観測結果を定量的に解釈する為の新しい理論モデルの構築を進め、これを完成させた。この理論モデルを用いた解析によって、我々の高密度の極低温 Rb・リュードベリ原子集団内に数十以上の原子の多体相関が生じていることが明らかになった。これまでの極低温リュ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、広帯域のパルスレーザーを導入するという独自の手法によって世界で初めて「高密度極低温リュードベリ気体」を実現し、桁違いの強相関状態を作り出すことに成功した。さらに、励起するリュードベリ状態のポピュレーションや主量子数、および光双極子トラップ中の原子数密度を調節することで、そのような多体量子ダイナミクスを積極制御することに成功した(図 2 と図 3)。また、パルス整形技術によってポンプパルスのスペクトル幅を調整しリュードベリ電子波束に含まれる固有状態の数を制御することに成功した。これは、リュードベリ電子波動関数の形状を調節することに相当しており、これによって多体相互作用が変化する事も確認された。このように、世界で唯一の超高速量子シミュレーターのプロトタイプをついに完成させる事ができた。5 年前の研究開始当初、超高速量子シミュレーターにおける多体相互作用の強度は、以下の 3 つの方法で調節できると見込んでいた:1)レーザー波長を変えることによってリュードベリ電子軌道の空間的な広がり(主量子数)を調節する;2)レーザー強度を変えることによってリュードベリ状態のポピュレーションを調節する;3)レーザーパルスを整形することによってリュードベリ電子波動関数の形状を調節する。今回完成した超高速量子シミュレーター・プロトタイプでは、これらすべてのチューニングノブが想像以上に敏感に動作する事を実証する事が出来た。このように、本 CREST 研究開始時点で提案した超高速量子シミュレーターの重要な概念のすべてと、それらを機能させる為に必要な新しい理論モデルを、予想を超えるレベルで実現する事に成功した(arXiv:1504.03635 (2015).)。

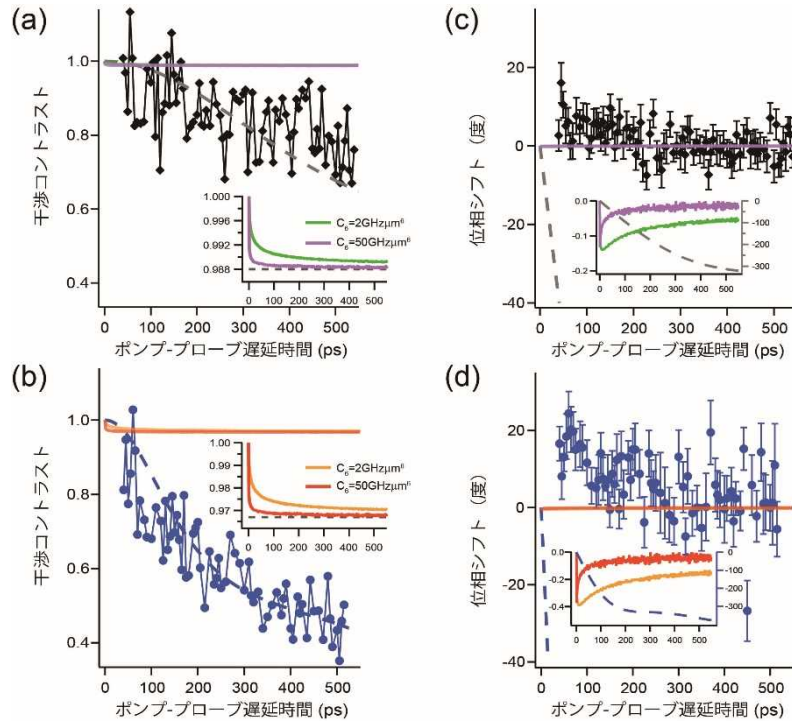


図 2: リュードベリ電子波束間相互作用の観測結果と理論解析。(a)と(b) 量子干渉信号における干渉コントラストのポンプ-プローブ遅延時間依存性。高密度の場合のコントラストを低密度のもので規格化した。低密度の場合に相互作用は無視できる。(c)と(d) 高密度と低密度の場合の量子干渉信号間の位相シフト。(a)と(c)はリュードベリ状態のポピュレーションが約 1.2%、(b)と(d)は約 3.3%の場合の結果である。実線は最近接原子間の二体相互作用のみを考慮した場合の解析結果で、破線は平均場近似での解析結果である。(N. Takei *et al.*, arXiv:1504.03635 (2015).)

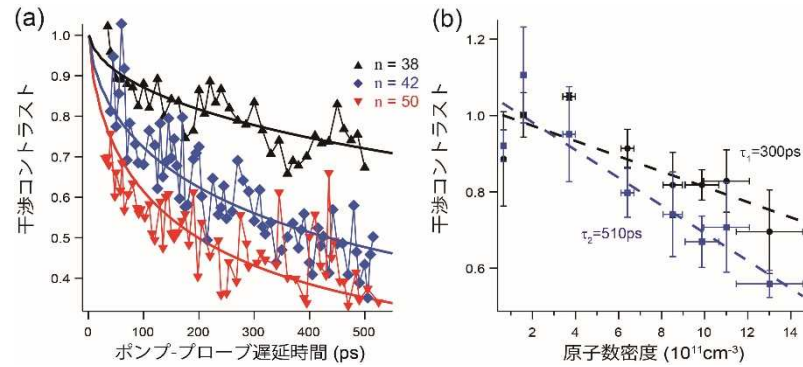


図 3: ラムゼー干渉コントラストの主量子数依存性および原子数密度依存性。(a)リュードベリ状態の主量子数 $n=38, 42, 50$ の場合の干渉コントラストのポンプ-プローブ遅延時間依存性。(b) 2 つの異なるポンプ-プローブ時間 $\tau_1=300\text{ps}$ と $\tau_2=510\text{ps}$ における干渉コントラストの原子数密度依存性。(N. Takei *et al.*, arXiv:1504.03635 (2015).)

(a-2) 光格子原子結晶生成に向けたボーズ・アインシュタイン凝縮の生成

シミュレーター実験に適した格子欠陥のない光格子原子結晶を作成するために、原子数密度の高いボーズ・アインシュタイン凝縮(BEC)を全光学的手法により生成した(図 4)。Rb 原子の低速原子線源として 2 次元磁気光学トラップを採用し、約 1 秒程度で BEC 生成に必要な原子数を 3 次元磁気光学トラップに捕捉することに成功した。そこから波長 1064nm の高出力レーザーを利用した交差型光双極子トラップに原子を移行し蒸発冷却を行った。5 秒程度の蒸発冷却によって、約 3 万個の原子数を持つ BEC の生成に成功した。

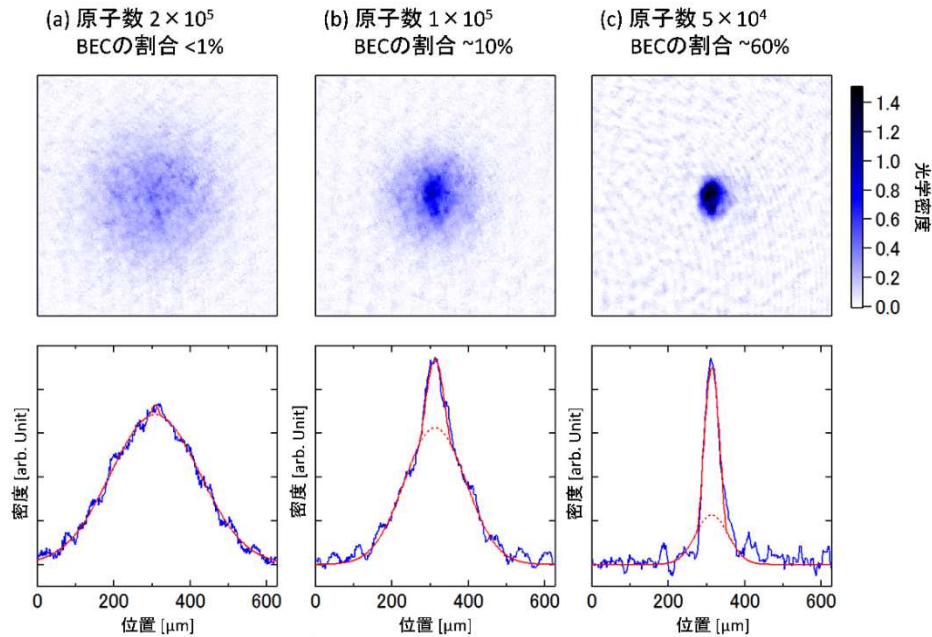


図 4: BEC の生成結果。冷却原子集団を光双極子トラップから解放し、20ms 自由拡散させた後に撮像した吸収像(上段)および密度分布(下段)。(a)は BEC 転移前であり、原子集団は等方的なガウス分布状に広がっている。(b)では一部の原子が BEC へと相転移しており、中心部にガウス分布とは別の鋭いピークが現れ始めている。(c)では鋭いピークの異方的な分布だけが残し、多くの原子が BEC へと相転移したことを示している。下段の密度分布のプロットにおける赤線は理論式に基づいたフィッティング結果であり、(b)と(c)では BEC 転移前後の原子集団が示す 2 種類の分布を足し合わせた密度分布となっていることが読み取れる。

(<https://ucan.physics.utoronto.ca/News/report.2015-06-08.8920876916/view>)

BEC を用いて高密度極低温リュードベリ気体を励起し、前述のように量子干渉測定を行うために、一つの特異成分に原子集団を準備することに成功した。全光学的手法により生成された Rb 原子の BEC は全スピン F が 1 の基底状態にあり、スピンの射影成分 mF について、+1, 0, -1 が混じった状態となっている。蒸発冷却中に重力方向に磁場勾配をかけることによって mF=+1 の成分のみを抽出することに成功した。さらに約 6.8GHz のマイクロ波を用いた断熱高速通過を利用して、全スピン F が 2、射影成分が mF=+2 のスピン状態へ原子を遷移させることに成功した。

このようにして生成した BEC を光格子に導入して原子結晶を作成する。あるいは BEC を用いた高密度極低温リュードベリ気体の研究を行う。

(a-3) 光格子原子結晶を用いた量子シミュレーター実験装置の構築

上記の BEC を光格子に導入して欠損の無い原子結晶を作成するための装置開発を進めた。既にこの装置を使って、図 5 に示すように BEC を光格子へと導入することに成功している。

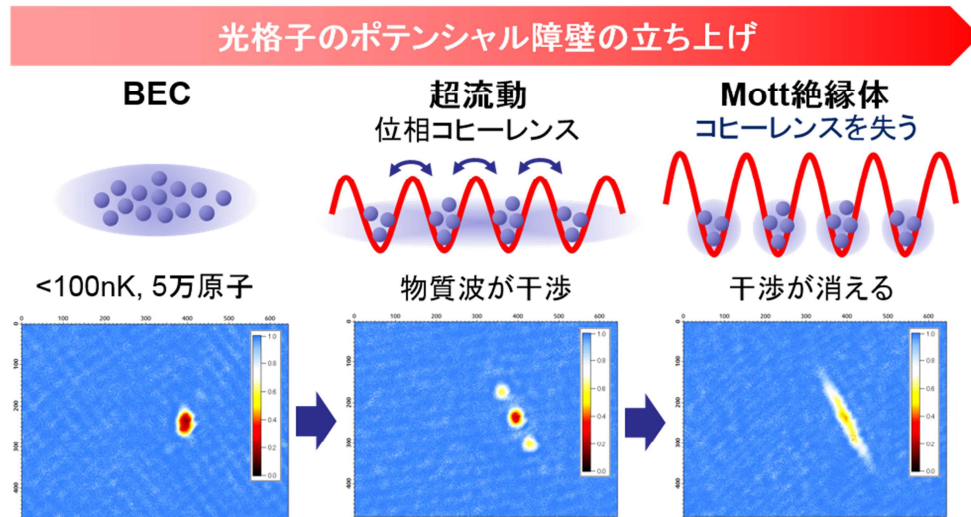


図 5: 光格子における超流動-Mott 絶縁体相転移。トラップから原子集団を解放し、15ms 自由拡散させた後に原子の吸収像を撮像した。

光格子原子結晶中に発生させたリュードベリ電子波束をイオン検出するための新たなイオン電極を設計・構築した。図 6a のように、それぞれ 4 個の部品から構成された 2 つのリング状の電極を設計し、リングの軸方向、および 2 つのリングの間の平面内においてレーザー光のアクセスを十分確保できる構造とした。これによって、原子トラップ・BEC 生成・リュードベリ励起とイオン検出の共存を可能とする電極構造となった。合計 8 個の各電極に独立に電圧を印加することによって、イオン検出効率の最適化を検討した。図 6b のように非常に多くの部品を真空槽内に配置したものの BEC 生成に必要な超高真空を確保することに成功した。

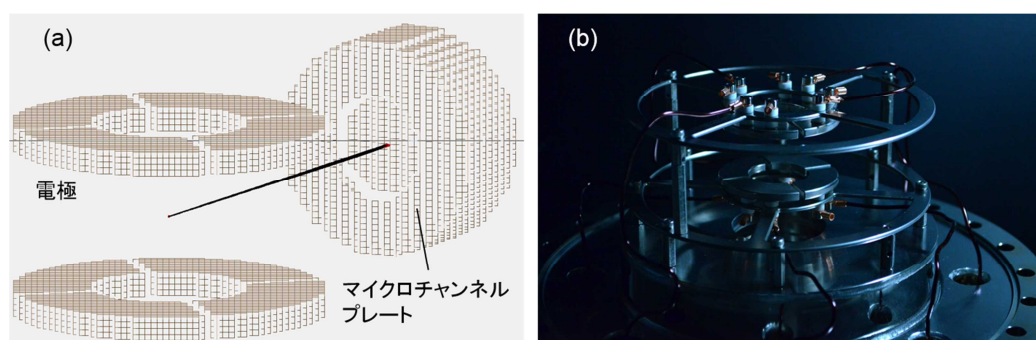


図 6: リュードベリ電子波束のイオン検出装置。(a) イオン検出電極とイオン化したリュードベリ原子のイオン軌跡の計算。黒い線が、8 個の電極の中心付近からマイクロチャンネルプレートへ向かう Rb^+ イオンの軌跡を表す。(b) 実際に組み立てたイオン検出電極の写真。

(a-4) 光格子の単一サイト観測に向けた顕微システムの評価

光格子原子結晶中に非局在化した波動関数の時空間発展を観測するために、光学顕微技術を導入して、光格子中の原子からの蛍光を観測する装置を準備・評価した。高 NA 対物レンズを原子結晶近傍に配置し、蛍光イメージングによる単一サイトの観測を行うことを目的とした。NA が 0.75、倍率 110 程度の顕微システムを構築し、直径 100nm ほどのナノホールを単一原子に見立てて顕微システムの分解能評価を行った(図 7)。使用する Rb 原子の蛍光波長 780nm と同じ波長のレーザーをナノホールの背面より照射し、その透過光を顕微システムで観測したところ、回折限界に近い約 800nm の分解能を得た。今後、この顕微システムに光格子との距離を微調整できる機構を導入し、上述の BEC および光格子原子結晶生成の実験装置に組み込む予定である。

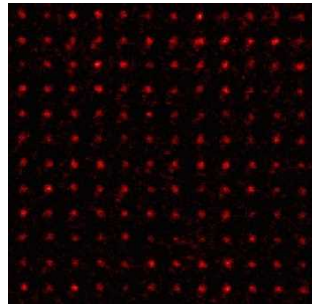


図 7: 顕微システムを用いたナノホールサンプルの透過光イメージ。直径約 100nm のナノホールアレイ(2.5 μ m 間隔)から成るサンプルを利用し、顕微システムの分解能評価を行い回折限界に近い約 800nm の分解能を得た。図は電荷増幅型 CCD カメラで撮像したサンプルのイメージである。なお、サンプルは分子科学研究所の飯野教授、京都大学の横川准教授より提供して頂いた。

(b) 超高速分子シミュレーター実験

我々がこれまでに開発してきたアト秒ピコメートル精度の超高速コヒーレント制御手法と光格子中の極低温分子集団を組み合わせた新しい量子シミュレーターを開発することを目的として研究を行った。光格子に導入する極低温分子の生成方法について超高速コヒーレント制御手法を用いた新たな方法論を開発することを目指し、ピコ秒パルスレーザーを用いた超高速光会合によって極低温分子を生成することに成功した。

光会合とは、基底状態にある 2 つの原子が衝突する際に、電子励起状態中の分子状態への遷移に共鳴するレーザー光を照射することによって、自由な 2 つの原子を会合し電子励起状態中に分子を生成する手法である。我々は、高密度光双極子トラップ中において基底状態(5S)にある Rb 原子集団に対し、5S-5P_{1/2} の D1 遷移よりも 20cm⁻¹ ほど赤方に離調をとったピコ秒パルスレーザーを照射し、励起状態 5S+5P_{1/2} に漸近する分子ポテンシャル中(主に 0u⁺状態)に分子を会合することに成功した。

なお、このようなパルスレーザーを用いた超高速光会合の提案者の一人であるドイツ・Kassel 大学の Christiane Koch 教授と協力して研究を進めた。

(c) バルク固体のコヒーレント制御実験

(c-1) 固体ビスマス中の原子の 2 次元運動の制御と可視化

ビスマスは結晶格子に 2 個の原子を持ち、c 軸方向のフォノン(A1g)と c 軸垂直平面内の縮退したフォノン(Eg)の 2 つの振動を持つ。東工大の中村グループと共同で、フェムト秒レーザーパルス対を用いてこのフォノン強度の制御を行った(Nature Commun. 4, 2801 (2013).)。ここでは、チャープをかけたフェムト秒レーザーパルス対を重ね合わせることで、THz 領域の光振動成分を制御した光パルスを用いた。光パルス間隔を制御することで A1g モードと Eg モードの強度を制御することができた。このことは、光パルスによって固体ビスマス中の原子の 2 次元運動を

制御したことを意味している。また、密度汎関数法を用いた計算により、反射率と原子変位との関係を求めることができ、光パルス照射後の原子の2次元運動を可視化することにも成功した。図8に、励起パルス列間隔が49.4fs、92.2fs、93.6fsの場合の結果を示す。49.4fsのときはc軸方向の運動、92.2fsのときはc軸に垂直な平面内での運動のみが起こっていることが分かる。この制御／画像化スキームは、「あらゆる物理系の2次元運動は直交した二つの1次元運動に分解することができる」というシンプル、堅固、かつ普遍的なコンセプトに基づいており、様々な凝縮系に適用することができる方法論として注目されている。

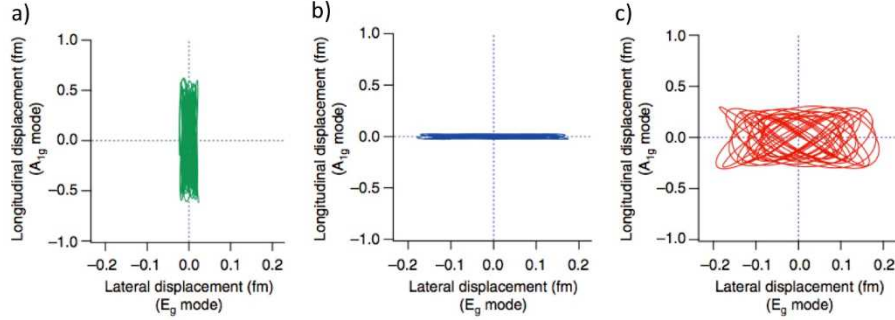


図8: ビスマス固体内の原子の2次元運動の制御。(a)パルス間隔49.4fs (b) 92.2fs (c) 93.6fs (H. Katsuki *et al.*, Nature Commun.4, 2801 (2013).)

(c-2) 固体パラ水素中の非局在量子状態の超高速コヒーレント制御

極低温で生成した、固体パラ水素にフェムト秒レーザーパルスを照射して振動励起を行った。生成したバイブロンはフレンケル型の励起であり、図9に示すように非局在化した状態を形成する。この状態にアト秒精度で位相ロックされたフェムト秒レーザーパルス対を照射することで、非局在化した波動関数の干渉実験を行った。照射パルス間隔を制御することで、波動関数の建設的干渉および破壊的干渉の計測に成功し、バルク固体中に非局在化した波動関数の制御に成功した(Phys. Rev. B 88, 014507 (2013).)。

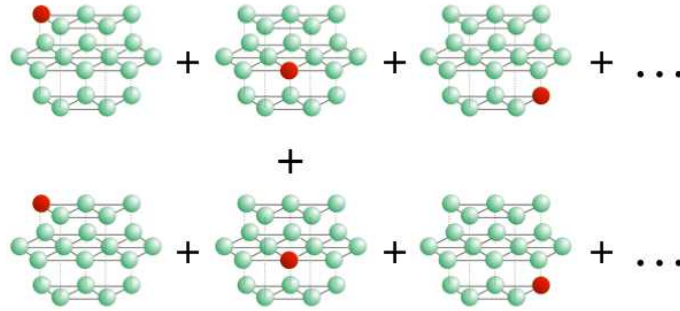


図9: 固体パラ水素結晶中に広がった vibron 波動関数の量子干渉実験。結晶中の1個の水素分子を振動励起すると、どの水素分子が励起されたか量子力学的に区別のつかない非局在化した波動関数が出現する。我々は、これらを二つ重ね合わせて、干渉をほぼ完全に制御することに成功した。(H. Katsuki *et al.*, Phys. Rev. B 88, 014507 (2013).)

(c-3) 高温超伝導体のコヒーレントフォノン計測

銅酸化物系の高温超伝導体である $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO) については、東工大の中村グループと共同で、コヒーレントフォノンを計測するとともにレーザーパルス対によるフォノンモードの制御を行った (Faraday Discussions 153, 375-382 (2011).)。フェムト秒レーザーを照射することで Cu-O と Ba-O 振動をコヒーレントに誘起することができる。超伝導転移温度以下の 8K において、励起パルスに時間間隔を制御したレーザーパルス対を用いることで Cu-O、Ba-O モードの振動強度の制御を行った。図 10 の左図にパルス間隔 (τ_{control}) を制御したときに Cu-O (4.5 THz) と Ba-O (3.5 THz) 振動の強度変化を示した。右図はパルス間隔が 0.41ps と 0.56ps の場合の振動のフーリエ変換スペクトルであり、遅延時間 0.41ps では Ba-O の振動だけが、0.56ps では Cu-O 振動だけが観測されている。YBCO における振動モードをレーザーパルス対による選択励起を実現した。

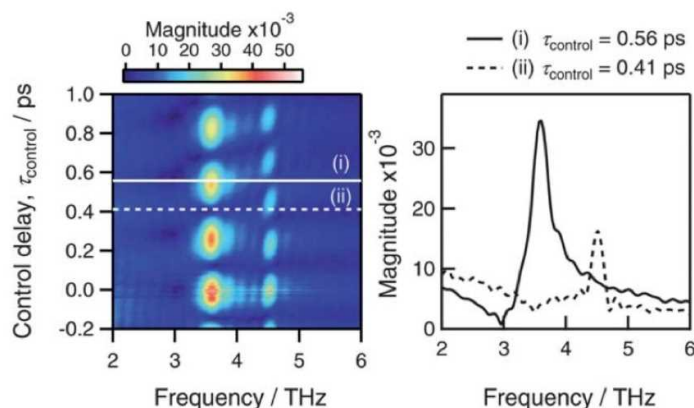


図 10: YBCO の過渡反射率のフーリエ変換スペクトルの 2 次元表示(左)と制御パルス列間隔 0.56ps および 0.41ps の場合にフーリエ変換スペクトル(右)
(Y. Okano *et al.*, Faraday Discussions **153**, 375-382 (2011).)

(d) デコヒーレンス制御技術の開発

非共鳴の赤外高強度フェムト秒レーザーパルスを照射して分子の電子ポテンシャルに擾乱を加えることによって、波束内の直交した複数の振動固有状態が混ざり合い干渉する「強レーザー誘起量子干渉」という新しい物理現象を見いだした (Nature Physics 7, 383 (2011).) (図 12)。強レーザー誘起量子干渉は様々な量子系のあらゆるタイプの量子固有状態に共通の普遍的な現象であり、量子系に書き込まれた情報を書き換えユニバーサルな論理ゲートを実行するための基盤技術として期待されるほか、デコヒーレンス制御の新しい手法としても期待される。また、超高速量子シミュレーター実験において多体波動関数の時空間発展に対する外部雑音の影響を調べる際に、熱雑音をモデル化するためのレーザー-speckle に応用できると期待される。

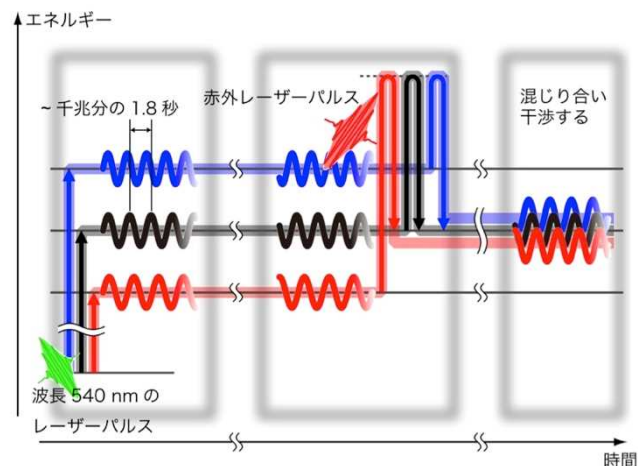


図 12: 強レーザー誘起量子干渉。従来は干渉しないと考えられていた分子の中の異なったエネルギー固有状態の波動関数が、高強度のフェムト秒赤外レーザーパルスの照射によって混じり合い干渉するという、新しい物理現象を発見した。

(H. Goto *et al.*, *Nature Phys.* **7**, 383 (2011).)

(e) 理論研究

(e-1) 超高速量子シミュレーター内の強相関多体電子ダイナミクスを記述する新しい理論モデルの開発

2 準位系粒子の多体相関に基づく超高速量子多体ダイナミクスを解析的かつ定量的に記述する新しい理論モデルを構築した。数十以上の多数の粒子集団における多体相関の計算は一般には膨大な計算量となるが、新しい理論モデルにおける解析解を用いれば容易に計算する事が出来る。この理論モデルを超高速量子シミュレーターのプロトタイプによる実験結果の解析に用いる事によって、数十以上の原子の間の多体相関とそれに基づく超高速多体電子ダイナミクスを定量的に再現する事が出来た(N. Takei *et al.*, *arXiv:1504.03635* (2015).)。本理論モデルは、2 準位の擬スピン系全般に適用可能な汎用性を有している。

(e-2) 核密度 (nuclear density) と核束密度 (nuclear flux density) に現れる波束干渉の理論研究

我々が開発してきたアト秒精度の極限コヒーレント制御技術では、これまで核密度 (nuclear density) に現れる波束干渉に注目して来た。本研究では、ヨウ素分子の振動波束を対象に、核束密度 (nuclear flux density) に現れる波束干渉に着目し、これを核密度の干渉と併せて議論することによって、波束干渉のダイナミクスに関するより多くの情報が得られることを理論的に証明した (*Molecular Physics*, **111**, 1691-1696 (2013).)。今後、量子シミュレーター班におけるリュードベリ電子波束干渉実験を推進する上での基盤知識として重要である。本研究はベルリン自由大学の Jörn Manz 教授のグループと大森グループとの共同研究である。

(e-3) 強レーザー誘起量子干渉のメカニズムに関する理論的研究

上記の我々が発見した「強レーザー誘起量子干渉」は、超高速量子シミュレーターにおける波動関数の局在化を人工的に誘発するための熱ノイズシミュレーターとして有効であると期待される。強レーザー誘起量子干渉とは、量子系の複数の量子固有状態が非共鳴の赤外高強度フェムト秒レーザーパルスによって混ざり合い干渉する現象である。本研究では孤立したヨウ素分子を対象に強レーザー誘起量子干渉の理論的な研究を行い、そのメカニズムの詳細を明らかにした (*Phys. Chem. Chem. Phys.* **16**, 5689-5697 (2014).)。今後、超高速量子シミュレーターにおいて波動関数の時空間発展を観測・制御する際の基盤知識として重要である。本研究は東北大学の大概幸義准教授と大森グループとの共同研究である。

3.2 バルク固体における量子コヒーレンスの探索と計測技術開発（東京工業大学 中村グループ）

(1) 研究実施内容及び成果

中村グループでは、バルク固体（半導体・超伝導体・強誘電体など）を対象として、位相制御フェムト秒パルス列を用いたフェムト秒時間分解過渡分光測定を行い、電子やフォノンにおける量子コヒーレンスを調べ、コヒーレント制御のための基礎特性を探ることを目的に研究を行った。またコヒーレンス及び機能計測のための新規計測技術開発を行うとともに、実験で得られる量子コヒーレンス計測の理論解析を行った。

具体的な研究内容とその成果を以下に示す。

(a) 半導体中のフォノン・プラズモン結合系のコヒーレント制御

極性半導体に、バンドギャップよりも高いエネルギーを持つ超短パルス光を照射すると、LOフォノンとプラズモン結合したLOPCモードの振動（ここでは特にL-モード）がコヒーレントに誘起される。GaAsの場合には、図13に示すように光学フォノンの振動数は9THz、フォノンプラズモン結合モードの振動数は8THzである。我々は、フェムト秒の時間精度で遅延時間を制御したフェムト秒レーザーパルス列を用いて試料（n型およびp型）を励起することで、フォノンとフォノン・プラズモン結合モードの生成強度を制御することに成功した。n型GaAsではパルス間隔を制御することで、フォノンの強度とフォノンプラズモン強度は、それぞれの振動数に応じて独立に制御することができた。一方p型GaAsでは、パルス間隔に対する両方のモードの強度は同じ振舞をすることが分かった。こうしたフォノン振動のコヒーレント制御の結果から、フォノン生成とフォノンプラズモン結合振動生成には遅延があることが示唆された（J. Hu et al., Phys. Rev. B 86, 235145 (2012).）。

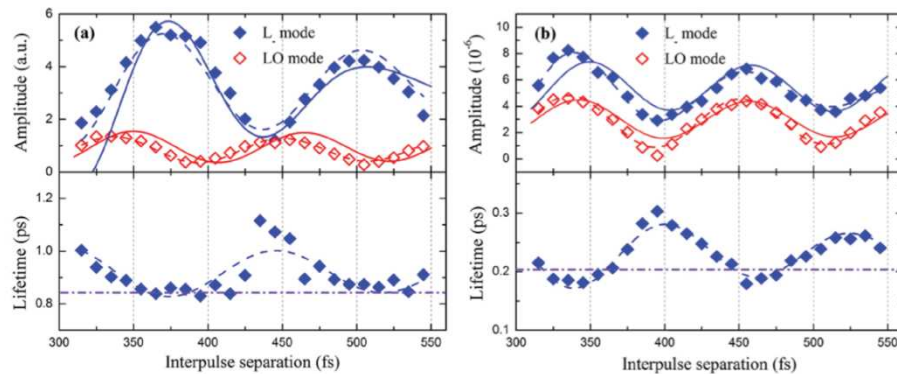


図13: コヒーレントフォノン強度と寿命のコヒーレント制御: (a) n型 GaAs, (b) p型 GaAs (J. Hu et al., Phys. Rev. B 86, 235145 (2012).)

コヒーレントフォノンの強度のコヒーレント制御に加えて、フォノンプラズモン結合モードでは、コヒーレント振動の寿命も励起パルス列の時間間隔によって制御できることを示した。LOフォノンではこうした寿命の変化は見られず、フォノンとプラズモンの結合モードに特有の現象であった。LOPCの振動強度は、実効的に励起されているキャリア電子密度に大きく依存していると考えられたため、励起されるキャリア電子密度が高くなることによって、プラズモン（電子・イオンの集団振動）の多体波動関数の位相緩和が加速されコヒーレンス寿命が短くなることが考えられる。この仮説を検証する為に、量子シミュレーター班が開発した超高速量子シミュレーター・プロトタイプを用いて、リュードバリ状態のポピュレーションが多体リュードバリ電子波動関数のコヒーレンス寿命にどのような影響を与えるかを詳細に検証した。その結果、固体中のキャリア電子密度に相当するリュードバリ電子状態のポピュレーションが高いほどコヒーレンスの減衰が加速される様子が観測された。これを新たに開発した理論モデルで解析したところ、ポピュレーションが上がる事によって多体相関が強くなり、その結果、波動関数の位相緩和が加速される事が見いだ

された(arXiv:1504.03635 (2015).)。そこで、この量子シミュレーター班における検証結果をバルク固体班にフィードバックし、アト秒精度で位相ロックされたフェムト秒レーザーパルス対を用いた干渉型過渡反射率計測を用いて、GaAs 結晶の電子・フォノン結合系における電子コヒーレンス寿命のキャリア電子密度依存性の測定を行った。しかし、室温の実験では量子コヒーレンス保持時間が約 45fs と短く、顕著なボヒューション効果が見られなかったため、現在は低温での詳細な測定を進めている。なお、低温でコヒーレンス寿命が延びることは実験的に確認済みである。

(b) 電子・フォノン結合系における量子コヒーレンス計測

半導体単結晶 n-型 GaAs を試料として、電子・フォノン結合系における量子コヒーレンスの保持時間を、新しく開発した干渉型過渡反射率計測法を用いた時間領域ラムゼー干渉法により計測することに成功した。干渉型過渡反射率計測法では、アト秒精度で位相ロックされたフェムト秒レーザーパルス対と時間遅延した1つのプローブパルスを用いたポンプ-プローブ型の過渡反射率計測を行う。第1パルスで生成した量子状態と、任意の遅延後に第2パルスで生成する量子状態の干渉の様子を、電気感受率の変調をととしてプローブ光の反射率変化として検出する(図 14)。

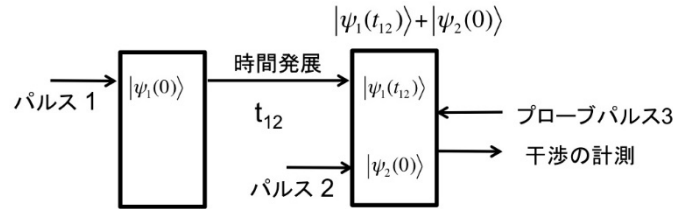


図 14: 干渉型過渡反射率測定法による量子コヒーレンス計測の概念図

この方法は、従来用いられている四光波混合法と異なり、電子状態の量子コヒーレンスを、フォノン状態をととして観測することで電子・フォノン結合系での量子コヒーレンスを計測できる。

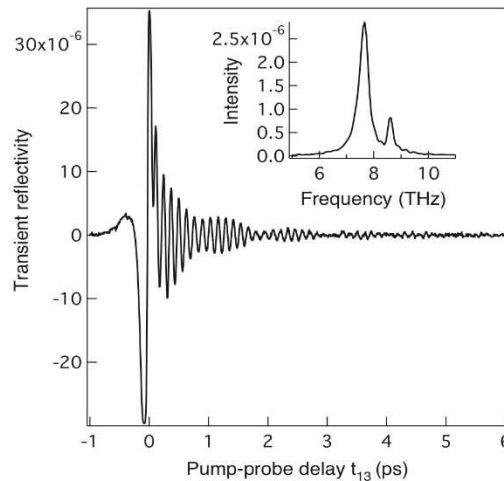


図 15: t_{12} を固定して t_{13} を変化させながら測定した過渡反射率とそのフーリエ変換

励起パルス列の時間間隔 t_{12} を固定して、ポンププローブの遅延時間 t_{13} を変えながら過渡反射率を計測したものが図 15 である。反射率の時間変化には、ビート構造が見られるが、これはコヒーレントに励起された 8.8THz の LO(Longitudinal Optical)フォノンと、7.8THz の光学フォノンとプラズモンが結合した LOPC(LO phonon plasmon coupled)モードによるものである。干渉型過渡反射率計測では、励起パルス列の時間間隔 t_{12} を 300 アト秒ステップで変化させ、その都度 t_{13} を変えながら過渡反射率を計測し、フーリエ変換スペクトルから LO フォノンおよび LOPC モードの強度を求める。

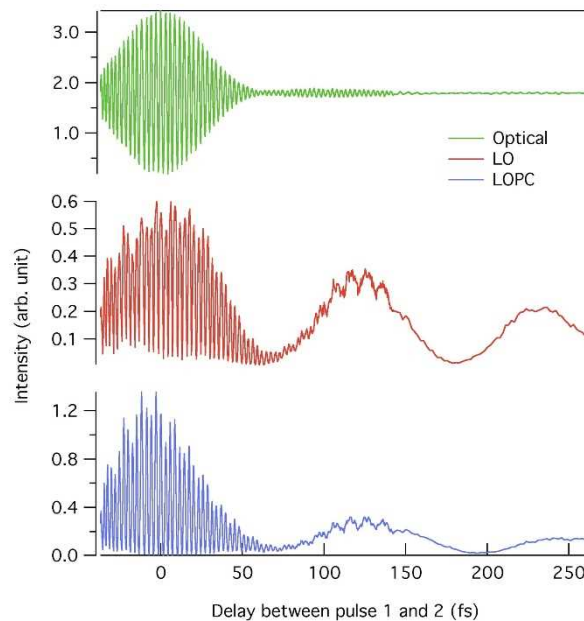


図 16: 励起パルス間隔(t_{12})を変えながら測定した LO フォノン(赤)および LOPC モード(青)の強度変化。(緑)は励起光パルスの強度干渉。

LO フォノン強度の励起パルス間隔依存性には、約 2.7fs 間隔の干渉と約 116fs 間隔の干渉の2つの干渉が観測された(図 16)。速い周期と遅い周期の干渉は、それぞれ電子コヒーレンスおよびフォノンコヒーレンスを表す干渉である。干渉の様子から、約 100fs 程度までは電子コヒーレンスが残っており、その後はフォノンのコヒーレンスだけが残っていることが分かる。電子コヒーレンスの保持状態を評価するために、早い周期の干渉の明瞭度の時間変化を図 17 に示す。

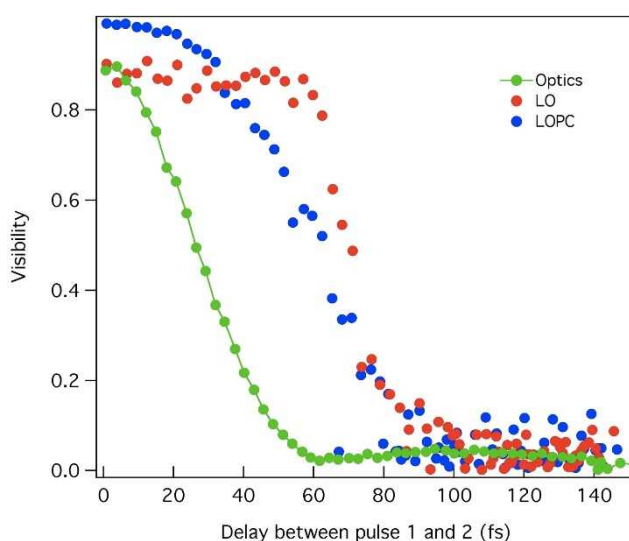


図 17: GaAs の量子干渉の明瞭度の励起パルス間隔(t_{12})に対する時間変化

干渉の明瞭度の時間変化から、光パルスの強度干渉に比べて GaAs 内部に量子コヒーレンスが長い時間保持されていることが分かる。明瞭度が 0.5 のところで比較すると、GaAs 内部には室温においても約 45fs の間量子コヒーレンスが保持される(量子メモリ効果)ことを初めて明らかにした。また、この結果は「アト秒精度で位相ロックされたフェムト秒レーザーパルス対を用いて電子・フォノン結合系の量子状態のコヒーレント制御した」ことを意味している。これらの実験結果は、2 準位系を用いた量子力学モデル計算により定性的に良く説明することができた (Sci. Rep. 4, 4456 (2014).)。

(c) フォノンスクイズド状態の発生と計測

フォノンの振動周期よりも短い光パルスで物質を励起すると、コヒーレントにフォノンが励起される。このときのフォノン状態は近似的にコヒーレント状態にある。コヒーレントフォノンの研究は多く行われているが、他の量子状態であるフォノンのスクイズド状態の発生は、これまでほとんど行われていない。理論的には、2 フォノン状態を発生することができれば、スクイズド状態を生成できることが予想される。我々は、1 次ラマン散乱確率が小さい ZnTe(110)を試料に用いることで、2 フォノンスクイズド状態の発生と計測を行った。

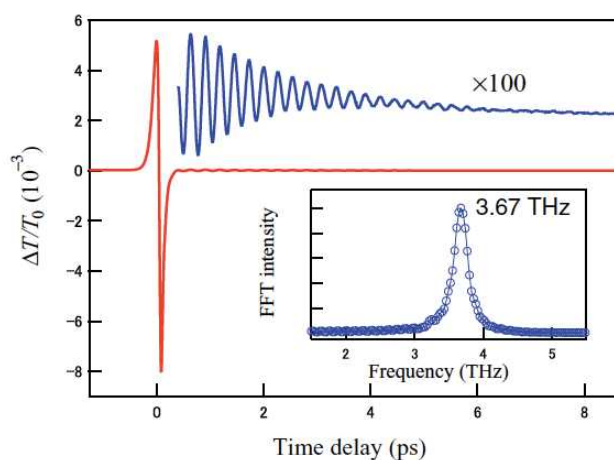


図 18: ZnTe(110)の過渡反射率とそのフーリエ変換。
(J. Hu *et al.*, Phys. Rev. B **84**, 224304 (2011).)

過渡反射率計測では 3.67THz の振動が観測でき、TA フォノンの 2 フォノン結合状態で形成されたフォノンスクイズド状態が発生していることが分かった。また、励起パルスを 2 連パルス対にし、その遅延時間を制御することで、フォノンスクイズド状態の強度を制御することに成功した(図 18) (Phys. Rev. B 84, 224304 (2011).; Phys. Lett. A 375, 4141 (2011).)。

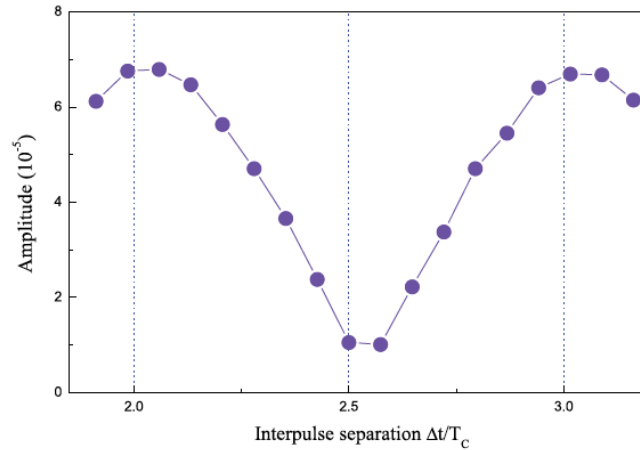


図 19: 2TA スクイズドフォノンのコヒーレント制御
(J. Hu *et al.*, Phys. Rev. B 84, 224304 (2011).)

図 19 にはパルス間隔が振動周期(T_c)の半整数倍のときに、フォノン強度が減少していることが示されている。

(d) トポロジカル絶縁体におけるキャリアおよびフォノンダイナミクス計測

トポロジカル絶縁体は、内部は絶縁体であるが表面は伝導電子をもつ新奇機能性物質である。表面電子の分散関係はディラックコーンを示す。近年、トポロジカル絶縁体はスピントロニクス材料として注目され、電子やフォノンのダイナミクスに興味をもたれている。これまで、フォノンについてはラマン測定を用いて多くの研究があるが、そのダイナミクスについてはほとんど測定されていなかった。我々は、カルコゲナイド系トポロジカル絶縁体(Sb_2Te_3 , Bi_2Te_3 , Bi_2Se_3)に関して、近赤外フェムト秒光パルスを用いた過渡反射率計測により、全てのラマン活性モードのコヒーレントフォノンを計測することに成功し、その寿命を求めることが出来た。また、中赤外光パルスを用いた反射率計測から、表面電子のダイナミクスの計測も行っている。

(e) ダイヤモンドにおけるコヒーレントフォノン計測

ダイヤモンドのフォノンは振動数が高いため熱環境の影響を受けづらく、室温でも比較的長いコヒーレンス時間を持つ。パルス幅がサブ 10fs のフェムト秒光パルスを用いてダイヤモンドの光学フォノンのダイナミクス計測を行った。

(f) コヒーレントフォノンの生成および計測の量子理論

コヒーレントフォノンはフォノンダイナミクスを実験的に直接計測する方法として、半金属、半導体、超伝導物質など多くの物質の研究に用いられている。しかし、コヒーレントフォノンの発生メカニズムについては、必ずしも明確にはなっていない。特に、光とバンドギャップが共鳴条件の場合には、矛盾した考え方が混在していることが多い。我々は、電子 2 準位系と調和振動子モデルを用いた量子力学計算により、コヒーレントフォノン生成のモデルを構築した。モデルから、光共鳴条件では瞬時的光吸収過程(IA: impulsive absorption)と瞬時的誘導ラマン過程(ISRS: impulsive stimulated Raman scattering)が共存することを明確に示した。図 21 には、共鳴条件において励起パルス幅を変化させたときに、IA 過程(赤線)と ISRS 過程(青線)で発生

するコヒーレントフォノンの振幅を計算したものを示す。パルス幅の単位は注目している光学フォノンの振動周期(T)である。パルス幅が短いときには、IA 過程が支配的であるのに対して、パルス幅が振動周期の半分程度の場合に IA 過程と ISRS 過程が同程度に寄与し、それよりも長いパルスでは ISRS 過程が支配的になる。さらに、フォノン振動方向を調べると IA 過程はコサイン型の振動、ISRS 過程はサイン型の振動し、その振動方向が逆向きであることが明らかになった。また、パルス幅に依存して IA 過程と ISRS 過程の比率が変化するために、コヒーレントフォノンによる振動振幅の平均値の時間変化の位相もパルス幅依存することが示された。

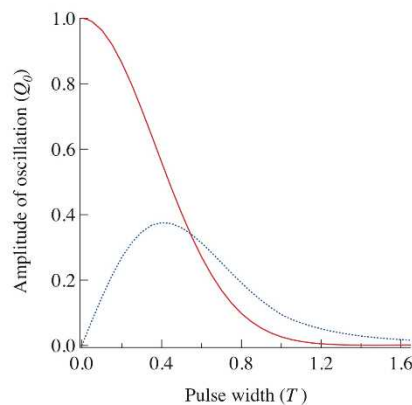


図 21: 生成するコヒーレントフォノン振幅の励起パルス幅依存性。IA 過程(赤)、ISRS 過程(青)。パルス幅の単位は注目している光学フォノンの振動周期(T)である。

(g) 半導体中のキャリアダイナミクス計測

n-型 GaAs と低温成長 GaAs を用いて、過渡反射率計測から光励起キャリアの寿命を計測した。n-型 GaAs では光励起キャリアの寿命が約 12ns であるのに対して、低温成長 GaAs では 220fs と寿命が非常に短いことが測定された。低温成長 GaAs では As のアンチサイト欠陥からの電子緩和により寿命が短くなっているものと考えられる。また、低温成長 GaAs では、n-型 GaAs と異なり、コヒーレントフォノンの生成が抑制された。

(h) 高温超伝導体のコヒーレントフォノン計測

鉄系高温超伝導体である FeTe_{0.75}Se_{0.25} 単結晶に関して、超伝導転移温度以下の 12K において過渡反射率計測を行い、コヒーレントフォノン計測を行った。4.5THz の A_{1g} モードのコヒーレント振動が計測でき、電子寿命が 1.2ps、フォノンの寿命が 0.62ps と求められ、電子フォノン結合定数を約 0.12 と見積もることが出来た。この値を用いて McMillan の公式から求めた、転移温度は 0.11K となり実験と大きくことなることから、FeTe_{0.75}Se_{0.25} 単結晶のクーパ対生成はフォノン相互作用だけでは説明できないことが示唆された (EPJ Web of Conference 41, 03009 (2013).)。

3. 3 凝縮系のアト秒コヒーレント制御理論の構築 (大阪府立大学 萱沼グループ)

(1) 研究実施内容及び成果

萱沼グループ(平成 22 年 10 月～平成 25 年 3 月)では、分子研・大森グループおよび東工大・中村グループでの実験を理論面から解析しサポートすることと、本研究課題「アト秒精度の凝縮系コヒーレント制御」の可能性を、さまざまなモデル計算を通じて理論的に探索することの二つを目的として研究を実施した。理論的研究の対象としては、大きく分けて(a)固体中電子の量子シミュレーターとして光格子上に配列された冷却原子系のコヒーレントダイナミクス および (b) 実在の固体中における電子・フォノン結合系のコヒーレントダイナミクス の二つがある。

どちらのケースも、時間に依存する外場のもとでの量子力学的コヒーレンスの制御と観測が主テーマである。

上記の 2 系列のテーマに関する研究実施内容と成果を述べる。

(a) 冷却原子系のコヒーレントダイナミクスの理論

実在の固体結晶中では、さまざまな擾乱が働いて電子系のコヒーレンスを阻害する。そこで光格子のつくる周期ポテンシャル中に捕捉された極低温原子を電子と読み替えることで、固体中のブロッホ状態にある電子のコヒーレントダイナミクスを実現する研究が急展開している。これを受けて、外場により駆動されたブロッホ電子(原子)のコヒーレントダイナミクスの理論を構築した。とくに 1 次元格子の場合、振動的な外場の効果について以下のような著しい特徴を预言した。

(a-1) ブロッホ電子の後方散乱抑制

不純物やポテンシャルバリアが結晶中に存在するとき、格子系のエネルギーが揺らされると、後方散乱が抑制され、とくに特定のパラメータ値(振動振幅と振動周期)において、完全に後方散乱が消失し、前方散乱が 100%の確率で起きる。これは、周期的に交差する量子準位間の破壊的位相干渉によるものである。この結果、不純物散乱の抑制、ポテンシャル障壁の完全透過、アンダーソン局在の動的消失などの特異な現象が预言される。(投稿準備)

(a-2) パイエルス絶縁体の金属絶縁体転移

低次元電子系に特有の量子相転移として、金属相が低温で絶縁体相に変わるパイエルズ転移が知られている。このパイエルズ絶縁体に振動外場を印加すると、ギャップが消失するパラメータ値が存在することを見出した。このメカニズムは、(a-1)の後方散乱の消失と同様の位相干渉効果により説明でき、完全にコヒーレントな現象である。

(a-3) ブロッホ・ゼナー振動のコヒーレント制御

固体の周期的ポテンシャル中における「自由」電子に定常電場を印加すると、真空中の自由電子とは異なり、加速と減速を繰り返し k 空間で波束が振動すること(ブロッホ振動)が 1930 年代から预言されていた。また、バンドギャップを通過する際に、異なるバンド間を非断熱遷移するゼナー遷移も古くから预言されていた。これらのブロッホ・ゼナー振動は、冷却原子による量子シミュレーターの到来により、初めて見事に実現された。ここで定常電場に加えて振動電場を印加すると、ゼナー遷移の増強や、波束の分裂・合体による複雑な波束の運動が誘起されることを理論的に预言した。(Phys. Rev. A 88, 023611 (2013).)

(b) 固体中における電子・フォノン結合系のコヒーレント制御

固体結晶表面に超短光パルスを照射すると、しばしばバルク結晶全体にわたるコヒーレントなフォノンの振動が観測される(コヒーレントフォノン)。平成 25 年 4 月以降は、萱沼が東工大中村グループに合流し、当研究室で展開中のコヒーレントフォノンの観測と制御の実験研究と協力して、理論構築および実験の解析を行った。

(b-1) コヒーレントフォノンによるバルク結晶の電子コヒーレンス測定と制御

GaAs 結晶を対象として、アト秒精度で位相ロックされたフェムト秒レーザーパルス対による電子コヒーレンスの計測が行われた(室温)。これは量子シミュレーター班の超高速量子シミュレーター実験の固体電子バージョンとみなすことができる。固体の場合は、電子のコヒーレンスは LO フォノンおよび LOPC モードの振動強度に転写され、反射率変動としてプローブされる。そこで電子系を光に共鳴する 2 準位系で近似した簡単な電子・フォノン弱結合モデルで実験の解析を行った。環境との相互作用から来る位相緩和と、励起パルスのスペクトル広がりから来る不均一位相緩和の双方を、Anderson-Kubo の確率過程モデルで取り込み、visibility の遅延時間依存性を解析した結果、測定データをよく再現するパラメータが決定された(Sci. Rep. 4, 4456

(2014).)。今後の展開として、現実的なバンド構造と誘電応答関数を使い、固体結晶における位相緩和のメカニズムを実験的に決定するための理論的枠組みを構築する。

(b-2) コヒーレントフォノンの生成機構と波長分解反射率測定モデル

コヒーレントフォノンの生成機構と、その測定メカニズムに関する統一的量子力学理論を構築した。生成および測定の双方で、結晶の透明域励起と不透明域励起の場合が存在する。また、関与するフォノンの対称性により生成・測定メカニズムが一般に異なる。これらについて、結晶のバンド構造と電子フォノン相互作用を取り込んだマイクロなモデルを作った。(国際会議講演および論文投稿準備中)

§ 4 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内(和文)誌 0 件、国際(欧文)誌 25 件)

1. N. Takei, C. Sommer, C. Genes, G. Pupillo, H. Goto, K. Koyasu, H. Chiba, M. Weidemüller, and K. Ohmori, “Direct observation of ultrafast many-body electron dynamics in a strongly-correlated ultracold Rydberg gas,” *arXiv*:1504.03635 (2015).
2. K. G. Nakamura, Y. Shikano, and Y. Kayanuma, “Influence of pulse width and duration on coherent phonon generation,” *Phys. Rev. B* **92**, 144304 (7 pages) (2015). (DOI: 10.1103/PhysRevB.92.144304)
3. M. Hada, W. Oba, M. Kuwahara, I. Katayama, T. Saiki, J. Takeda, and K. G. Nakamura, “Ultrafast time-resolved electron diffraction revealing the nonthermal dynamics of near-UV photoexcitation-induced amorphization in $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$,” *Sci. Rep.* **5**, 13530 (2015). (DOI:10.1038/srep13530)
4. Y. Tsuchimoto, T-A. Yano, M. Hada, K. G. Nakamura, T. Hayashi, and M. Hara, “Thermally-controlled electromagnetic properties of Si-based dielectric nanostructures in the visible region,” *Small* (2015) (6 pages). (DOI:10.1002/sml.201500884)
5. K. Norimatsu, M. Hada, S. Yamamoto, T. Sasagawa, M. Kitajima, Y. Kayanuma, and K. G. Nakamura, “Dynamics of All the Raman Active Coherent Phonons in Sb_2Te_3 revealed via Transient Reflectivity,” *J. Appl. Phys.* **117**, 143102 (6 pages) (2015). (DOI: 10.1063/1.4917384)
6. K. Ohmori, “Optically Engineered Quantum States in Ultrafast and Ultracold Systems,” *Found. Phys.* **44**, 813-818 (2014). (DOI: 10.1007/s10701-014-9773-5)
7. Y. Ohtsuki, H. Goto, H. Katsuki, and K. Ohmori, “Theoretical/numerical study on strong-laser-induced interference in the B state of I_2 ,” *Phys. Chem. Chem. Phys.* **16**, 5689-5697 (2014). (DOI: 10.1039/C3CP54023E)
8. S. Hayashi, K. Kato, K. Norimatsu, M. Hada, Y. Kayanuma, and K. G. Nakamura, “Measuring quantum coherence in bulk solids using dual phase-locked optical pulses,” *Sci. Rep.* **4**, 4456 (5 pages), (2014). (DOI: 10.1038/srep04456)
9. H. Katsuki, J. C. Delagnes, K. Hosaka, K. Ishioka, H. Chiba, E. S. Zijlstra, M. E. Garcia, H. Takahashi, K. Watanabe, M. Kitajima, Y. Matsumoto, K. G. Nakamura, and K. Ohmori, “All-optical control and visualization of ultrafast two-dimensional atomic motions in a single crystal of bismuth,” *Nature Commun.* **4**, 2801 (7 pages) (2013). (DOI:10.1038/ncomms3801)
-  Highlighted by Nature Japan (<http://www.natureasia.com/ja-jp/ncomms/abstracts/50595>).
10. H. Katsuki, Y. Kayanuma, and K. Ohmori, “Optically engineered quantum interference of delocalized wavefunctions in a bulk solid : The example of solid para-hydrogen,” *Phys. Rev. B* **88**, 014507 (6 pages) (2013). (DOI: 10.1103/PhysRevB.88.014507)
11. T. Bredtmann, H. Katsuki, J. Manz, K. Ohmori, and C. Stemmler, “Wavepacket interferometry for nuclear densities and flux densities,” *Molecular Physics*, **111**, 1691-1696 (2013). (DOI: 10.1080/00268976.2013.780103)
12. N. Norimatsu, J. Hu, A. Goto, K. Igarashi, T. Sasagawa, and K. G. Nakamura, “Coherent optical phonons in Bi_2Se_3 single crystal measured via transient anisotropic reflectivity,” *Solid State Commun.* **157**, 58-61 (2013). (DOI: 10.1016/j.ssc.2012.12.023)
13. J. Hu, O. V. Misochko, and K. G. Nakamura, “Manipulation of squeezed two-phonon bound states using femtosecond laser pulses,” *EPJ Web of Conference* **41**, 04019 (3 pages) (2013). (DOI: 10.1051/epjconf/20134104019)
14. Y. Kabasawa, T. Eda, J. Hu, I. Katayama, J. Takeda, M. Kitajima, T. Katagiri, T. Sasagawa, and K. G. Nakamura, “Ultrafast quasiparticle dynamics of $\text{FeTe}_{0.75}\text{Se}_{0.25}$ superconductor,” *EPJ Web of Conference* **41**, 03009 (3 pages) (2013). (DOI: 10.1051/epjconf/20134103009)
15. K. Norimatsu, J. Hu, A. Goto, K. Igarashi, T. Sasagawa, and K. G. Nakamura, “Dynamics of optical phonons in Bi_2Se_3 crystal studied using femtosecond time-resolved reflection measurement,” *EPJ Web of Conference* **41**, 03008 (3 pages) (2013). (DOI: 10.1051/epjconf/20134103008)

16. Y. Mizumoto and Y. Kayanuma, “Double Landau-Zener interferometry in a DC-AC driven Bloch-Zener oscillation,” *Phys. Rev. A* **88**, 023611 (4 pages) (2013). (DOI: 10.1103/PhysRevA.88.023611)
17. J. Hu, O. V. Misochko, A. Goto, and K. G. Nakamura, “Delayed formation of coherent LO phonon-plasmon coupled modes in GaAs unveiled by femtosecond coherent control technique,” *Phys. Rev. B* **86**, 235145 (6 pages) (2012). (DOI: 10.1103/PhysRevB.86.235145)
18. K. G. Nakamura, J. Hu, K. Norimatsu, A. Goto, K. Igarashi, and T. Sasagawa, “Observation of coherent higher frequency A_{1g} phonons in Bi_2Se_3 using femtosecond time-resolved reflection measurement,” *Solid State Commun.* **152**, 902-904 (2012). (DOI: 10.1016/j.ssc.2012.02.004)
19. Y. Mizumoto and Y. Kayanuma, “Role of a Nontrivial Quantum Phase in the Dynamical Band Gap Collapse,” *Phys. Rev. A* **86**, 035601 (4 pages) (2012). (DOI: 10.1103/PhysRevA.86.035601)
20. H. Goto, H. Katsuki, H. Ibrahim, H. Chiba, and K. Ohmori, “Strong-laser-induced quantum interference,” *Nature Physics* **7**, 383-385 (2011). (DOI: 10.1038/nphys1960)
 Covered by “News and Views” in *Nature Physics*; *Nature Physics* **7**, 373 (2011).
 Covered by “Research Highlights” in *Nature Photonics*; *Nature Photonics* **5**, 382 (2011).
21. Y. Okano, H. Katsuki, Y. Nakagawa, H. Takahashi, K. G. Nakamura, and K. Ohmori, “Optical manipulation of coherent phonons in superconducting $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ thin films,” *Faraday Discussions* **153**, 375-382 (2011). (DOI: 10.1039/C1FD00070E) (invited paper)
22. J. Hu, O. V. Misochko, H. Takahashi, H. Koguchi, T. Eda, and K. G. Nakamura, “Ultrafast zone-center coherent lattice dynamics in ferroelectric lithium tantalite,” *Science and Technology of Advanced Materials*, **12**, 034409 (4 pages) (2011). (DOI:10.1088/1468-6996/12/3/034409)
23. O. V. Misochko, J. Hu, and K. G. Nakamura, “Controlling phonon squeezing and correlation via one- and two-phonon interference,” *Physics Letters A*, **375**, 4141-4146 (2011). (DOI:10.1016/j.physleta.2011.09.054)
24. J. Hu, O. V. Misochko, and K. G. Nakamura, “Direct observation of two-phonon bound states in ZnTe ,” *Phys. Rev. B* **84**, 224304 (4 pages) (2011). (DOI: 10.1103/PhysRevB.84.224304)
25. Y. Kayanuma, “Quantum Betatron,” *J. Phys. Conf. Series*, **302**, 012041 (4 pages) (2011). (DOI:10.1088/1742-6596/302/1/012041)

(2)その他の著作物(総説、書籍など)

1. 大森賢治 編著, [アト秒科学 ~1 兆分の 1 秒スケールの超高速現象を光で観測・制御する~], 化学同人 教科書 ISBN-13:978-4759818055, 2015.
2. 香月浩之, 大森賢治, “アト秒精度のコヒーレント制御”, 強光子場の化学 分子の超高速ダイナミクス (CSJ Current Review), 日本化学会編, 12 章, 2015.
3. K. Ohmori, “Quantum Superrotor,” *Physics* **7**, 29 (2014).
4. 中村一隆, “固体中のコヒーレントフォノン”, 強光子場の化学 分子の超高速ダイナミクス (CSJ Current Review), 日本化学会編, 15 章, 2015.
5. 中村一隆, “位相制御光パルス列を用いたフォノンのコヒーレント制御”, 電気学会研究会資料, OQD-14-024 (2014).

(3)国際学会発表及び主要な国内学会発表

① 招待講演 (国内会議 20 件、国際会議 66 件)

1) 招待講演(国内会議)

1. 大森賢治, “アト秒精度の超高速光量子シミュレーター: 超多体ダイナミクス専用プラットフォームの開発”, 計算分子科学研究拠点 第6回研究会, 岡崎カンファレンスセンター, 2016年3月14-15日.
2. 大森賢治, “量子力学に残された100年の謎に迫る”, サイテックサロン, 東京大学駒場キャンパス駒場ファカルティハウス, 2015年12月5日.
3. 大森賢治, “アト秒ピコメートル精度の時空間量子エンジニアリング”, 日本顕微鏡学会第71回学術講演会, 国立京都国際会館, 2015年5月13日.
4. 大森賢治, “イントロダクトリートーク”, 第7回超高速時間分解光計測研究会「凝縮系の超高速多体ダイナミクス」, ホテルクラウンパレス浜松, 2015年3月4日.
5. 大森賢治, “イントロダクトリートーク”, 第6回超高速時間分解光計測研究会「ソフトマターの先端光計測」, ホテルクラウンパレス浜松, 2014年3月4日.
6. 大森賢治, “極限光計測で探る量子／古典境界”, 第5回超高速時間分解光計測研究会「極限光計測」, ホテルクラウンパレス浜松, 2013年2月21日.
7. 大森賢治, “原子のさざ波と不思議な量子の世界”, 名古屋大学大学院理学研究科物質理学専攻(化学系)特別講義公開講演会, 名古屋大学野依記念物質科学研究館, 2013年1月17日.
8. 大森賢治, “アト秒時空量子エンジニアリング; 物質がもつ波の性質を光で完璧に制御する”, 第3回豊田理研懇話会, (公財)豊田理化学研究所 オープンコミュニティ, 2012年12月24日.
9. 大森賢治, “イントロダクトリートーク”, 第4回超高速時間分解光計測研究会「光と物性の相互作用の積極制御」, ホテルクラウンパレス浜松, 2012年3月9日.
10. 大森賢治, “Single molecule can calculate 1000 times faster than supercomputers”, 東京大学グローバル COE プログラム「未来を拓く物理科学結集教育研究拠点」セミナー, 東京大学本郷キャンパス, 2011年12月21日.
11. 大森賢治, “世界最速スパコンより1000倍速くナノより小さい1分子コンピューター”, 東北大学グローバル COE プログラム「分子系高次構造体化学国際教育研究拠点」シンポジウム2011, 東北大学片平キャンパス, 2011年11月19-20日.
12. 大森賢治, “原子のさざ波と不思議な量子の世界”, 第104回国研セミナー, 分子科学研究所, 2011年11月1日.
13. 大森賢治, “量子シミュレーター”, 第8回AMO討論会, 東京大学本郷キャンパス, 2011年6月17-18日.
14. 大森賢治, “アト秒ピコメートル精度の時空間量子エンジニアリング～極低温分子からバルク固体まで～分子コンピューターの実現に向けて”, Chemistry and Fundamental Science, 東京大学駒場キャンパス, 2011年5月6-7日.
15. 武井宣幸, “極低温リユードベリ原子の超高速コヒーレント制御”, 分子研研究会・先端的レーザー分光技術による分子科学の新展開, 岡崎カンファレンスセンター, 2013年2月12日.
16. 田中陽, 武田俊太郎, 溝口道栄, 武井宣幸, Christian Sommer, 子安邦明, 後藤悠, Claudiu Genes, Guido Pupillo, 千葉寿, Matthias Weidemüller, 大森賢治, “光格子中のリユードベリ原子集団の量子多体効果の観測に向けて”, 第5回QUATUO研究会, 高知工科大, 2016年1月10日.
17. 中村一隆, “凝縮系物質中のコヒーレント制御”, 研究会「レーザーと物質科学の接点」, 大阪大学レーザーエネルギー学研究センター, 2016年2月22日.
18. 中村一隆, “位相制御光パルス列を用いてフォノンのコヒーレント制御”, 第14回レーザー学会東京支部研究会&電気学会 光・量子デバイス技術研究会「先端光・量子源で見る物体・物質の構造」, 東海大学高輪校舎, 東京, 2014年3月5日.
19. 中村一隆, “コヒーレントフォノンダイナミクス”, 第2回コンパクトERLサイエンスワークショップ, つくば, 2012年7月30日.

20. 中村一隆, “フェムト秒レーザー励起によるキャリア・フォノンダイナミクス”, 日本化学会新領域研究グループ「液相高密度エネルギーナノ反応場」第2回研究会, 日本化学会(東京), 2012年1月30日.

2) 招待講演(国際会議)

1. * K. Ohmori, “Direct observation and control of ultrafast many-body electron dynamics in a strongly-correlated ultracold Rydberg gas”, OIST Mini Symposium “Rydberg Atoms for Quantum Technologies”, Okinawa, Japan, March 3-5, 2016.
2. * K. Ohmori, “Direct observation of ultrafast many-body electron dynamics in a strongly-correlated ultracold Rydberg gas,” Perspectives in Nano Information Processing: an international conference and workshop, Cambridge, UK, December 14-16, 2015.
3. * K. Ohmori, “Direct observation of ultrafast many-body electron dynamics in a strongly-correlated ultracold Rydberg gas,” The 12th US-Japan Seminar on Quantum Electronics and Laser Spectroscopy, Madison, USA, September 20-24, 2015.
4. * K. Ohmori, “Direct observation of ultrafast quantum many-body dynamics in a strongly-correlated ultracold Rydberg gas,” The 12th Femtochemistry Conference, Hamburg, Germany, July 12-17, 2015.
5. * K. Ohmori, “Ultrafast many-body electron dynamics in a strongly-correlated ultracold Rydberg gas,” Gordon Research Conference on “Atomic Physics”, Newport, USA, June 14-19, 2015.
6. * K. Ohmori, “Ultrafast Electron Dynamics Beyond Mean-Field in a Strongly-Correlated Ultracold Rydberg Gas,” Coherence and Control in the Quantum World: Current and Future Trends, Weizmann Institute of Science, Rehovot, Israel, December 15-18, 2014.
7. * K. Ohmori, “Exploring Quantum-Classical Boundary with Light,” Fujihara Seminar: Real-time Dynamics of Physical Phenomena and Manipulation by External Fields, Tomakomai, Hokkaido, Japan, September 23-27, 2014.
8. * K. Ohmori, “Ultrafast Many-Body Dynamics in an Ultracold Rydberg Gas,” Ultracold Rydberg Physics Workshop, Granada, Spain, September 10-12, 2014.
9. * K. Ohmori, “Exploring Quantum-Classical Boundary with Coherent Control,” Coherence and Control in the Quantum World: the Legacy of Moshe Shapiro, University of British Columbia, Canada, August 13-15, 2014.
10. * K. Ohmori, “Ultrafast Coherent Control of an Ultracold Rydberg Gas,” Physikalisches Kolloquium, University of Heidelberg, Germany, January 17, 2014 (本講演は第11回 JSPS 日独コロキウム of the Plenary Lecture として行われた: 11th Germany-Japan Science Colloquium, Heidelberg, Germany, January 16-17, 2014).
11. * K. Ohmori, “Ultrafast Coherent Control of an Ultracold Rydberg Gas,” Networks of Ultra-Cold Rydberg Atoms, Keble College in Oxford, UK, January 9-10, 2014.
12. * K. Ohmori, “Ultrafast Coherent Control of an Ultracold Rydberg Gas,” Laser Science XXIX, (the 29th Annual Meeting of the American Physical Society), Hilton Bonnet Creek, Florida, USA, October 6-10, 2013.
13. * K. Ohmori, “Ultrafast Coherent Control of an Ultracold Rydberg Gas,” Conference on Quantum Information and Quantum Control, Fields Institute, Toronto, Canada, Aug 12-16, 2013.
14. * K. Ohmori, “Ultrafast Coherent Control of an Ultracold Rydberg Gas,” Gordon Research Conference on “Quantum Control of Light and Matter,” Mount Holyoke College, South Hadley, MA, USA, July 28 - August 2, 2013.
15. * K. Ohmori, “Ultrafast Coherent Control of an Ultracold Rydberg Gas,” Quantum Dynamics and Spectroscopy in Condensed-Phase Materials and Bio-Systems, TSRC, Telluride, USA, July 8-12, 2013.

16. K. Ohmori, "Ultrahigh-precision Coherent Control at the Quantum-classical Boundary," Strasbourg Physique Seminaires, CLEO-PR & OECC/PS 2013 Workshop on C-Special: Photon Frontier Network, Kyoto, Japan, June 30, 2014.
17. K. Ohmori, "Spatiotemporal Quantum Engineering with Picometer and Attosecond Precision," Strasbourg Physique Seminaires, Strasbourg University, Strasbourg, France, May 23, 2013.
18. K. Ohmori, "Spatiotemporal Quantum Engineering with Picometer and Attosecond Precision," Atomic and laser physics seminar series, Department of Physics, University of Oxford, Oxford, UK, May 20, 2013.
19. * K. Ohmori, "Ultrafast Coherent Control of an Ultracold Rydberg Gas," The 11th US-Japan Joint Seminar on Quantum Electronics and Laser Spectroscopy (The US-Japan QELS-11) "Ultimate Quantum Systems of Light and Matter- Control and Applications", Nara, Japan, April 11, 2013.
20. K. Ohmori, "Optically Engineered Quantum States in Ultrafast and Ultracold Systems," 3rd IMS-ENSCP Joint Seminar, IMS, Okazaki, Japan, February 13, 2013. (病気のため、武井が代理)
21. K. Ohmori, "Optically Engineered Quantum States in Ultrafast and Ultracold Systems," KITP Program "Fundamental Science and Applications of Ultra-cold Polar Molecules," KITP UC Santa Barbara, Santa Barbara, USA, February 5, 2013. (病気のためキャンセル)
22. K. Ohmori, "Optically Engineered Quantum States in Ultrafast and Ultracold Systems," Physics Colloquium, University of Freiburg, Freiburg, Germany, December 3, 2012.
23. * K. Ohmori, "Optically Engineered Quantum States in Ultrafast and Ultracold Systems," ESF Research Conference in Partnership with LFUI on "Cold and Ultracold Molecules," Universitätszentrum Obergurgl, Austria, November 22, 2012.
24. K. Ohmori, "Optically Engineered Quantum States in Ultrafast and Ultracold Systems," Workshop on "Molecular Functional Dynamics: Fundamental to Life Activity," IMS, Okazaki, Japan, October 26, 2012.
25. * K. Ohmori, "Optically Engineered Quantum States in Ultrafast and Ultracold Systems," International Workshop: "Horizons of Quantum Physics: from Foundations to Quantum-Enabled Technologies," American Club Taipei, Taipei, Taiwan, October 16, 2012.
26. * K. Ohmori, "Quantum simulator of quantum/classical boundary," The '240' Conference, The University of Chicago, Chicago, USA, September 14, 2012.
27. * K. Ohmori, "Exploring quantum/classical boundary," The '240' Conference, The University of Chicago, Chicago, USA, September 13, 2012.
28. * K. Ohmori, "Ultrafast Coherent Control of an Ultracold Rydberg Gas," Batsheva de Rothschild Seminar on "Laser Control of Chemical Reactions: Toward Deciphering Mechanisms and Understanding the Theoretical and Experimental Limits," Ruth-Rimmonim Hotel, Safed, Israel, September 3, 2012.
29. K. Ohmori, "Spatiotemporal quantum engineering with picometer and attosecond precision," Special Seminar on "Theoretical Chemistry," Institut für Chemie und Biochemie, Freie Universität Berlin, Berlin, Germany, June 19, 2012.
30. * K. Ohmori, "Optically Engineered Quantum States in Ultrafast and Ultracold Systems," International Conference on Superconductivity and Magnetism: ICSM 2012, Artemis Marin Princess Hotel, Kumburgaz-Istanbul, Turkey, May 4, 2012.
31. K. Ohmori, "Optically Engineered Quantum States in Ultrafast and Ultracold Systems," IMS Japan – WIS Workshop, Weizmann Institute of Science, Rehovot, Israel, February 26, 2012.
32. K. Ohmori, "Single Molecule can Calculate 1000 Times Faster than Supercomputers," KAIST Physics Colloquium, Daejeon, Korea, February 13, 2012.
33. K. Ohmori, "Optically Engineered Quantum States in Ultrafast and Ultracold Systems," Center for Quantum Dynamics Seminar, Universität Heidelberg, Heidelberg, Germany, January 19, 2012.

34. * K. Ohmori, "Ultrafast Computing with a Femtosecond-Laser-Driven Molecule," Architecture and Design of "supported" single Molecule Logic Gates and atom circuits, Barcelona, Spain, January 12-13, 2012.
35. K. Ohmori, "Single Molecule can Calculate 1000 Times Faster than Supercomputers," International Symposium on Physics and Applications of Laser Dynamics 2011, Tainan, Taiwan, December 7, 2011.
36. * K. Ohmori, "Optically Engineered Quantum States in Ultrafast and Ultracold Systems," Meet APS Fellow Forum, National Tsing Hua University, Hsinchu, Taiwan, December 6, 2011.
37. * K. Ohmori, "Attosecond Quantum Engineering," Germany-Japan Colloquium "From the Early Universe to the Evolution of Life," Heidelberg, Germany, December 1-3, 2011.
38. K. Ohmori, "Single Molecule can Calculate 1000 Times Faster than Supercomputers," Frontier in Molecular Science based on Photo and Material, Paris, France, November 7-8, 2011.
39. * K. Ohmori, "Ultrafast Computing with a Femtosecond-Laser-Driven Molecule," International Workshop on Simulation and Manipulation of Quantum Systems for Information Processing (SMQS-IP), Juelich, Germany, October 17-19, 2011.
40. * K. Ohmori, "Ultrafast Computing with a Femtosecond-Laser-Driven Molecule," International Workshop "Engineering and Control of Quantum Systems," Dresden, Germany, October 10-14, 2011.
41. * K. Ohmori, "Ultrafast Computing with a Femtosecond-Laser-Driven Molecule," International Workshop on Coherence and Decoherence at Ultracold Temperatures, Institute for Advanced Study of Technische Universitat Munchen in Garching/Munich, Germany, September 6-9, 2011.
42. * K. Ohmori, "Coherent Control; Present and Future," Gordon Research Conference on "Quantum Control of Light and Matter," Mount Holyoke College, South Hadley, MA, USA, July 31 - August 5, 2011.
43. K. Ohmori, "Single Molecule Can Calculate 1000 Times Faster than Supercomputers," Special Seminar at Physics Department of Oxford University, Oxford, UK, July 28, 2011.
44. * K. Ohmori, "Optical Manipulation of Coherent Phonons in Superconducting YBa₂Cu₃O_{7-δ} Thin Films," Faraday Discussion 153: Coherence and Control in Chemistry, Leeds, UK, July 25-27, 2011.
45. K. Ohmori, "Single Molecule can Calculate 1000 Times Faster than Supercomputers," 14th Korea-Japan Joint Symposium on Frontiers of Molecular Sciences "New Visions for Spectroscopy and Computation: Temporal and Spatial Adventures of Molecular Sciences", Busan, Korea, July 6-8, 2011.
46. * K. Ohmori, "Molecular Eigenstate-Based Information Processing," Lorentz Center Workshop on "Molecular Logic," Lorentz Center, Leiden, Netherland, May 30 - June 2, 2011.
47. * K. Ohmori, "Ultrafast Fourier Transform with a Femtosecond-Laser-Driven Molecule," The Third International Workshop on Dynamics and Manipulation of Quantum Systems (DMQS2010), Tokyo, Japan, February 15, 2011.
48. * K. Ohmori, "Ultrafast Fourier Transform with a Femtosecond-Laser-Driven Molecule," ERATO Macroscopic Quantum Control Conference on Ultra Cold Atoms and Molecules (UCAM2011), Tokyo, Japan, January 25, 2011.
49. N. Takei, "Ultrafast coherent control of an ultracold Rydberg gas," 15th Japan-Korea Symposium on Molecular Science: Hierarchical Structure from Quantum to Functions of Biological Systems, Hotel Kitano Plaza Rokkoso, Kobe, Japan, July 3-5, 2013.
50. * N. Takei, "Ultrafast coherent control of an ultracold Rydberg gas," International Workshop on Cooperative Quantum Dynamics and Its Control (CQDC'12), Jülich Supercomputing Center, Jülich, Germany, October 31, 2012.

51. N. Takei, “Ultrafast coherent control of an ultracold Rydberg gas,” International Workshop on Quantum Dynamics and Quantum Walks, Okazaki Conference Center, Okazaki, Japan, November 25, 2012.
52. N. Takei, “Ultrafast coherent control of an ultracold Rydberg gas,” The 72nd Okazaki Conference on “Ultimate Control of Coherence”, Okazaki Conference Center, Okazaki, Japan, January 9, 2013.
53. * C. Sommer, “Ultrafast many-body dynamics in an ultracold Rydberg gas,” Quantum Dynamics and Spectroscopy in Condensed-Phase Materials and Bio-Systems, Telluride Elementary School, Telluride, CO, USA, June 8-12, 2015.
54. K. G. Nakamura, “Ultrafast phenomena at nanoscale,” International Symposium on Ultraintense Laser Science 14 (as discussion Leader), Hawaii, USA, December 9-14, 2015.
55. K. G. Nakamura, “Control of quantum coherence in a bulk solid,” Physics Colloquium in KAIST (Korea Advanced Institute of Science and Technology), Daejeon, Korea, October 27, 2015.
56. K. G. Nakamura, “Spectrally resolved detection of coherent optical phonons in diamond,” 6th Shanghai Tokyo Advanced Research on Ultrafast Intense Laser Science, May 20-22 (2015).
57. K. G. Nakamura, “Dynamics in a non-equilibrium state revealed with ultrashort light pulses,” International Symposium on Sustainable Space Development and Space Situational Awareness, The Grand Hall, Shinagawa, Tokyo, Japan, February 27, 2015.
58. K. G. Nakamura, “Optical control and visualization of atomic motion in a bulk solids,” The 5th Shanghai Tokyo Advanced Research on Intense Laser Science, Miyazaki, Japan, May 21-23, 2014.
59. K. G. Nakamura, “Optical control of quasiparticles in a bulk solid,” A Peter Wall Colloquium Abroad and The 73rd Okazaki Conference on “Coherent and Incoherent Wave Packet Dynamics”, Okazaki, Japan, October 30-November 2, 2013.
60. K. G. Nakamura, “Solid and intense laser field (as a discussion leader),” The 12th International Symposium on Intense Laser Science, Salamanca, Spain, October 6-11, 2013.
61. K. G. Nakamura, “Carrier and phonon dynamics in strongly correlated electron system,” The 4th Shanghai Tokyo Advanced Research on Ultrafast Intense Laser Science, Shanghai, China, May 5, 2013.
62. K. G. Nakamura, “Coherent control of quasiparticle wave packets in condensed matter,” the 7th Asian Symposium on Intense Laser Science, Tokyo, 2012, November 8-9.
63. K. G. Nakamura, “Optical control of atomic motion in condensed matter by femtosecond laser pulses,” The 3rd Shanghai Tokyo Advanced Research on Ultrafast Intense Laser Science, Odawara, 2012, May 17.
64. K. G. Nakamura, “Optical control of coherent phonons in superconductors,” 3rd International Conference on Ultraintense Laser Interaction Science, Lisbon, Portugal, 2011 Oct. 10-13.
65. Y. Kayanuma, “Ultrafast coherent control of electron-phonon entangled state in bulk solids,” 17th International Conference on Luminescence and Optical Spectroscopy of Condensed Matter, Poland, July 14, 2014.
66. Y. Kayanuma, “Nontrivial role of a quantum phase in driven dynamics,” The 11th Tamura Memorial Symposium, Frontiers in nanoscience, Sakai, Japan, December 3, 2011.

② 口頭発表 (国内会議 35 件、国際会議 8 件)

1) 口頭発表(国内会議)

1. 武田俊太郎, 田中陽, 武井宣幸, Christian Sommer, 溝口道栄, 子安邦明, 千葉寿, 大森賢治, “3 ビーム交差型光双極子トラップを用いた全光学的手法による ^{87}Rb 原子の

- BEC 生成”, 日本物理学会第 71 回年次大会, 東北学院大学泉キャンパス, 2016 年 3 月 21 日.
2. 田中陽, 武田俊太郎, 武井宣幸, Christian Sommer, 溝口道栄, 子安邦明, 千葉寿, 大森賢治, “光格子中の強相関リユードベリ原子集団の超高速多体ダイナミクスの観測を目指した超高真空装置の開発”, 日本物理学会第 71 回年次大会, 東北学院大学泉キャンパス, 2016 年 3 月 21 日.
 3. 武井宣幸, Christian Sommer, Claudiu Genes, Guido Pupillo, 後藤悠, 子安邦明, 千葉寿, Matthias Weidemüller, 大森賢治, “強相関極低温リユードベリ気体における平均場近似を超えた超高速電子ダイナミクスの観測”, 日本物理学会第 70 回年次大会, 早稲田大学早稲田キャンパス, 2015 年 3 月 22 日.
 4. 武井宣幸, Christian Sommer, 後藤悠, 子安邦明, 千葉寿, Claudiu Genes, Guido Pupillo, Matthias Weidemüller, 大森賢治, “多体相互作用するリユードベリ電子波束の観測と制御”, 日本物理学会第 69 回年次大会, 東海大学湘南キャンパス, 2014 年 3 月 29 日.
 5. 武井宣幸, Christian Sommer, 後藤悠, 子安邦明, 千葉寿, Guido Pupillo, Matthias Weidemüller, 大森賢治, “極低温リユードベリ原子の超高速コヒーレント制御 II”, 日本物理学会第 68 回年次大会, 広島大学東広島キャンパス, 2013 年 3 月 27 日.
 6. 武井宣幸, Christian Sommer, 子安邦明, 千葉寿, 大森賢治, “極低温リユードベリ原子の超高速コヒーレント制御”, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 横浜国立大学常盤台キャンパス, 2012 年 9 月 21 日.
 7. 武井宣幸, Giorgi Veshapidze, 千葉寿, 子安邦明, 大森賢治, “極低温リユードベリ原子の超高速コヒーレント制御”, 第 5 回分子科学討論会, 札幌コンベンションセンター, 2011 年 9 月 23 日.
 8. 則松桂, 羽田真毅, 田中誠一, 山本宗平, 石川忠彦, 恩田健, 笹川崇男, 中村一隆, “トポロジカル絶縁体 Sb_2Te_3 の光励起キャリアダイナミクス”, 応用物理学会, 東京, 2016 年 3 月 19 日-22 日.
 9. 横田謙祐, 萱沼洋輔, 越知章, 則松桂, 近藤倫央, 鹿野豊, 中村一隆, “位相ロックパルス対による GaAs 単結晶電子フォノン結合系のコヒーレント制御 I”, 日本物理学会 2016 年第 71 回年次大会, 東北学院大学泉キャンパス, 2016 年 3 月 19 日.
 10. 萱沼洋輔, 横田謙祐, 越知章, 則松桂, 近藤倫央, 鹿野豊, 中村一隆, “位相ロックパルス対による GaAs 単結晶電子フォノン結合系のコヒーレント制御 II”, 日本物理学会 2016 年第 71 回年次大会, 東北学院大学泉キャンパス, 2016 年 3 月 19 日.
 11. 大矢数馬, 高橋弘史, 鶴田哲也, 魚住真一, 則松桂, 北島正弘, 萱沼洋輔, 鹿野豊, 中村一隆, “波長分解型過渡反射率計測を用いたダイヤモンドのコヒーレント光学フォノン”, 応用物理学会, 名古屋, 2015 年 9 月 13 日.
 12. 羽田真毅, 大庭航, 桑原正史, 片山郁文, 斎木敏治, 武田淳, 中村一隆, “フェムト秒電子線回折で見る近紫外光照射による $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ の非熱的アモルファス化”, 応用物理学会, 名古屋, 2015 年 9 月 13 日.
 13. 中村一隆, 加藤啓吾, 則松桂, 近藤倫央, 羽田真毅, 萱沼洋輔, 鹿野豊, “アト秒位相制御パルス列を用いた GaAs 結晶中の電子フォノン結合系のコヒーレンス計測”, 第 32 回量子情報技術研究会, 大阪大学豊中キャンパス, 2015 年 5 月 25, 26 日.
 14. 羽田真毅, 則松桂, 田中誠一, Keskin Sercan, 鶴田哲也, 五十嵐九四郎, 石川忠彦, 恩田健, 萱沼洋輔, Miller R. J. Dwayne, 笹川崇男, 腰原伸也, 中村一隆, “時間分解電子線回折法を用いたのポロジカル絶縁体の光誘起ダイナミクスの観測”, 日本物理学会第 70 回年次大会, 早稲田大学, 2015 年 3 月 23 日.
 15. 則松桂, 羽田真毅, 田中誠一, 鶴田哲也, 五十嵐九四郎, 笹川崇男, 恩田健, 腰原伸也, 中村一隆, “トポロジカル絶縁体 Bi_2Te_3 の光励起電子・格子ダイナミクス”, 第 62 回応用物理学会春期学術講演会, 東海大学, 2015 年 3 月 14 日.

16. 羽田真毅, 則松桂, 田中誠一, Keskin Sercan, 鶴田哲也, 五十嵐九四郎, 石川忠彦, 萱沼洋輔, Miller R. J. Dwayne, 笹川崇男, 恩田健, 腰原伸也, 中村一隆, “フェムト秒時間分解電子線回折法の開発:トポロジカル絶縁体の光誘起ダイナミクスの観測”, 第62回応用物理学会春期学術講演会, 東海大学, 2015年3月14日.
17. 鶴田哲也, 則松桂, 加藤啓吾, 大矢数馬, 羽田真毅, 萱沼洋輔, 北島正弘, 中村一隆, “低温成長GaAsの超高速キャリア格子相互作用”, 第35回レーザー学会学術講演大会, 東海大学高輪キャンパス, 2015年1月12日.
18. 加藤啓吾, 近藤倫央, 越知章, 則松桂, 鶴田哲也, 羽田真毅, 萱沼洋輔, 中村一隆, “GaAs(100)結晶における電子-フォノン結合系の電子コヒーレンス計測”, 第35回レーザー学会学術講演大会, 東海大学高輪キャンパス, 2015年1月12日.
19. 則松桂, 羽田真毅, 山本宗平, 笹川崇男, 中村一隆, “トポロジカル絶縁体 Sb_2Te_3 のコヒーレント光学フォノン”, 第75回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学, 2014年9月17-20日.
20. 中村一隆, 加藤啓吾, 則松桂, 羽田真毅, 萱沼洋輔, “バルク結晶における電子-フォノン結合系のアト秒コヒーレントダイナミクス”, 日本物理学会2014年秋季大会, 中部大学, 2014年9月7-10日.
21. 林真吾, 加藤啓吾, 則松桂, 中村一隆, “アト秒位相制御パルス列を用いた GaAs の量子コヒーレンス制御”, 第61回応用物理学会春期学術講演会, 青山大学, 2014年3月17日.
22. 則松桂, 魚住真一, 林真吾, 山本宗平, 笹川崇男, 中村一隆, “トポロジカル絶縁体 Sb_2Te_3 の超高速表面ダイナミクス”, 第61回応用物理学会春期学術講演会, 青山大学, 2014年3月17日.
23. 則松桂, 魚住真一, 胡建波, 五十嵐九四郎, 山本宗平, 笹川崇男, 中村一隆, “カルコゲン系化合物のコヒーレントフォノンダイナミクス”, 第60回応用物理学会春期学術講演会, 神奈川工科大学, 2013年3月27日.
24. 原田慎一, 後藤有宏, 胡建波, 中村一隆, “村型 InP のコヒーレント LO フォノン制御”, 第60回応用物理学会春期学術講演会, 神奈川工科大学, 2013年3月27日.
25. 桃澤祐樹, 江田恭之, 胡建波, 片山郁文, 武田淳, 北島正弘, 片桐隆雄, 笹川崇男, 中村一隆, “鉄系超伝導物質 $\text{FeTe}_{0.75}\text{Se}_{0.25}$ の超高速コヒーレントフォノン計測”, レーザー学会学術講演会第32回年次大会, YKP 仙台カンファレンスセンター, 2012年1月30日.
26. 則松桂, 胡建波, 後藤有宏, 五十嵐九四郎, 笹川崇男, 中村一隆, “ Bi_2Se_3 単結晶のコヒーレントフォノン計測”, レーザー学会学術講演会第32回年次大会, YKP 仙台カンファレンスセンター, 2012年1月30日.
27. 後藤有宏, 胡建波, 原田慎一, Oleg Misochko, 中村一隆, “極性半導体 GaAs のフォノン-プラズモン結合モードの光制御”, レーザー学会学術講演会第32回年次大会, YKP 仙台カンファレンスセンター, 2012年1月30日.
28. 江田恭之, 小口寛彬, 片山郁文, 武田淳, 北島正弘, 神原陽一, 中村一隆, “ $\text{SmFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$ ($x=0.075$) のコヒーレントフォノン計測”, レーザー学会学術講演会第32回年次大会, YKP 仙台カンファレンスセンター, 2012年1月30日.
29. 小口寛彬, 高橋弘史, 中島光雅, 宇津木寛, 舟窪浩, 中村一隆, “強誘電体 PbTiO_3 のコヒーレント光学フォノン”, レーザー学会学術講演大会第31回年次大会, 電気通信大学, 2011年1月9日.
30. 萱沼洋輔, 齋藤圭司, “振動外場による Dirac 点近傍のバンド構造変化”, 日本物理学会第70回年次大会, 早稲田大学, 2015年3月24日.
31. 萱沼洋輔, 則松桂, 羽田真毅, 中村一隆, “不透明領域励起におけるコヒーレントフォノン生成機構”, 日本物理学会2014年秋季大会, 中部大学, 2014年9月7日.
32. 萱沼洋輔, 水本義彦, “DC-AC 外場で駆動された Bloch-Zener 振動の2重干渉効果”, 日本物理学会第68回年次大会, 広島大学, 2013年3月28日.

33. 萱沼洋輔, 水本義彦, 溝口幸司, 大畠悟郎, “コヒーレントフォノン場におけるスペクトル分解反射率変調の理論”, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 横浜国立大学, 2012 年 9 月 19 日.
34. 水本義彦, 萱沼洋輔, “振動外場中の一次元格子系におけるポテンシャル散乱の理論”, 日本物理学会第 67 回年次大会, 関西学院大学, 2012 年 3 月 26 日.
35. 水本義彦, 萱沼洋輔, “振動外場によるブロッホ電子の散乱制御”, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山大学, 2011 年 9 月 21 日.

2) 口頭発表(国際会議)

1. M. Mizoguchi, S. Takeda, A. Tanaka, N. Takei, C. Sommer, K. Koyasu, H. Goto, C. Genes, G. Pupillo, H. Chiba, M. Weidemüller, and K. Ohmori, “All-optical generation of a ^{87}Rb Bose-Einstein condensate to be transformed into a defect-free Rydberg crystal in an optical lattice”, OIST Mini Symposium “Rydberg Atoms for Quantum Technologies”, Okinawa, Japan, March 3-5, 2016.
2. N. Takei, Christian Sommer, Haruka Goto, Kuniaki Koyasu, Hisashi Chiba, Yasuaki Okano, Guido Pupillo, Claudiu Genes, Matthias Weidemüller, and Kenji Ohmori, “Ultrafast coherent control meets ultracold systems,” The 3rd Advanced Lasers and Photon Sources, Pacifico Yokohama, Japan, April 23, 2014.
3. K. G. Nakamura, K. Kato, K. Norimatsu, M. Hada, Y. Kayanuma, “Coherent control of electron-phonon coupled state in GaAs using phase-locked femtosecond pulses,” Phononics 2015, Paris, May 31-June 5 (2015).
4. S. Uozumi, K. Norimatsu, K. Igarashi, S. Yamamoto, T. Sasagawa, and K. G. Nakamura, “Observation of coherent optical phonons in Bi_2Se_3 , Bi_2T_3 , and Sb_2Te_3 using femtosecond time-resolved reflection measurement,” 7th International Conference on Science and Technology of Advanced Ceramics, Yokohama, Japan, July 19-21, 2013.
5. J. Hu, O. V. Misochiko, A. Goto, and K. G. Nakamura, “Manipulating coherent LO phonons and phonon-plasmon coupling in highly doped p-GaAs,” Conference of Laser and Electro-Optics (CLEO/QELS), San Jose, USA, May 6-11 (2012).
6. Y. Kayanuma and K. Saito, “Morphology Change of Dirac Cones under Intense Electromagnetic Fields,” 11th International Conference on Excitonic and Photonic Processes in Condensed Matter and Nano Materials, Montreal, Canada, May 19, 2015.
7. Y. Kayanuma, Y. Mizumoto and K. Mizoguchi, “Detection-Frequency Resolved Measurement of Coherent Phonons as a Probe of the Dielectric Constant of Semiconductors,” 5th International Conference on Optical, Optoelectronic and Photonic Materials and Applications, Nara, Japan, June 4, 2012.
8. Y. Kayanuma, “Dynamical Transparency of Tunneling: an Inverse CDT?,” The International Workshop on Dynamics and Manipulation of Quantum Systems, Tokyo, Japan, February 15, 2011.

③ ポスター発表 (国内会議 16 件、国際会議 43 件)

1) ポスター発表(国内会議)

1. 田中陽, 武田俊太郎, 武井宣幸, Christian Sommer, Quynh Nguyen, 子安邦明, Claudiu Genes, Guido Pupillo, Matthias Weidemüller, 千葉寿, 横川隆司, 飯野亮太, 大森賢治, “Towards probing Rydberg wave-packet dynamics in an optical lattice”, 基礎物理学研究所研究会『量子制御技術の発展により拓かれる量子情報の新時代』, 京都大学基礎物理学研究所, 2015 年 7 月 13 日.
2. 武井宣幸, Christian Sommer, 子安邦明, 千葉寿, 大森賢治, “極低温リユードベリ原子の超高速コヒーレント制御”, 第 9 回 AMO 討論会, 理化学研究所大河内記念ホール, 2012 年 6 月 15-16 日.
3. 武井宣幸, Christian Sommer, 後藤悠, 子安邦明, 千葉寿, Guido Pupillo, Matthias Weidemüller, 大森賢治, “極低温リユードベリ原子の超高速コヒーレント制御”, 第 5 回

文部科学省 最先端の光の創成を目指したネットワーク研究拠点プログラムシンポジウム, 日本科学未来館, 東京, 2013 年 1 月 11 日.

4. 武井宣幸, Giorgi Veshapidze, 千葉寿, 子安邦明, 大森賢治, “極低温リユードベリ原子の超高速コヒーレント制御”, 第 8 回 AMO 討論会, 東京大学本郷キャンパス, 2011 年 6 月 17-18 日.
5. 武井宣幸, Giorgi Veshapidze, 千葉寿, 子安邦明, 大森賢治, “極低温リユードベリ原子の超高速コヒーレント制御”, 第 12 回エクスリームフォトニクス研究会, 理化学研究所, 和光, 2011 年 6 月 30 日.
6. 武井宣幸, Giorgi Veshapidze, 千葉寿, 子安邦明, 大森賢治, “極低温リユードベリ原子の超高速コヒーレント制御”, 第 4 回文部科学省最先端の光の創成を目指したネットワーク研究拠点プログラムシンポジウム, 名古屋キャッスルプラザホテル, 2011 年 11 月 14 日.
7. 佐々木寛也, 大矢数馬, 高橋弘史, 今泉拓也, 萱沼洋輔, 鹿野豊, 中村一隆, “ダイヤモンド光学フォノンのコヒーレント制御”, 応用物理学会, 東京, 2016 年 3 月 19-22 日.
8. 大矢数馬, 鶴田哲也, 魚住真一, 則松桂, 北島正弘, 萱沼洋輔, 鹿野豊, 中村一隆, “フェムト秒パルスを用いたダイヤモンド光学フォノンのコヒーレント励起と時間発展計測”, 第 32 回量子情報技術研究会, 大阪大学, 2015 年 5 月 25, 26 日.
9. 後藤賢一, 萱沼洋輔, 中村一隆, “コヒーレントフォノンの振動位相と励起波長依存性”, 日本物理学会第 69 回年次大会, 東海大学湘南キャンパス, 2014 年 3 月 29 日.
10. 則松桂, 胡建波, 後藤有宏, 五十嵐九四郎, 笹川崇男, 中村一隆, “ Bi_2Se_3 単結晶のコヒーレントフォノン計測”, 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 早稲田大学, 2012 年 3 月 17 日.
11. 萱沼洋輔, 鶴田哲也, 中村一隆, “低温成長 GaAs における超高速電子フォノンダイナミクス”, 日本物理学会第 70 回年次大会, 早稲田大学, 2015 年 3 月 23 日.
12. 萱沼洋輔, 則松桂, 羽田真毅, 中村一隆, “不透明領域励起におけるコヒーレントフォノン生成機構”, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 中部大学, 2014 年 9 月 7 日.
13. 萱沼洋輔, 鶴田哲也, 中村一隆, “低温成長 GaAs における超高速電子フォノンダイナミクス”, 日本物理学会第 70 回年次大会, 早稲田大学, 2015 年 3 月 23 日.
14. 水本義彦, 萱沼洋輔, “DC-AC 外場下の Bloch-Zener 振動における波束分岐と合流”, 第 23 回光物性研究会, 熊本大学, 2012 年 12 月 7 日.
15. 萱沼洋輔, 水本義彦, 森裕紀, 大畠悟郎, 溝口幸司, “コヒーレントフォノン分光法で私たちは何を見ているのか?”, 第 23 回光物性研究会, 熊本大学, 2012 年 12 月 7 日.
16. 水本義彦, 萱沼洋輔, “振動外場による Bloch-Zener 遷移のコヒーレント制御”, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 横浜国立大学, 2012 年 9 月 18 日.

2) ポスター発表(国際会議)

1. A. Tanaka, S. Takeda, N. Takei, C. Sommer, Q. Nguyen, K. Koyasu, C. Genes, G. Pupillo, M. Weidemüller, H. Chiba, R. Yokogawa, R. Iino, and K. Ohmori, “Towards observation of Rydberg wave-packet dynamics in an optical lattice,” Gordon Research Conferences: Atomic Physics, Salve Regina University, Newport, RI, USA, June 14-19, 2015.
2. S. Takeda, A. Tanaka, N. Takei, C. Sommer, C. Genes, G. Pupillo, H. Goto, K. Koyasu, H. Chiba, M. Weidemüller, and K. Ohmori, “Ultrafast many-body electron dynamics of Rydberg atoms in disordered and ordered systems,” Gordon Research Conferences: Atomic Physics -From Ultracold to Strongly Interacting Quantum Systems-, Salve Regina University, Newport, RI, USA, June 14-19, 2015.
3. C. Sommer, N. Takei, H. Goto, K. Koyasu, H. Chiba, G. Pupillo, C. Genes, M. Weidemüller, and K. Ohmori, “Ultrafast coherent control of an ultracold Rydberg gas,” Fujihara Seminar: Real-time Dynamics of Physical Phenomena and Manipulation by External Fields, Grand Hotel New Oji, Tomakomai, Hokkaido, Japan, September 24-26, 2014.

4. N. Takei, C. Sommer, H. Goto, K. Koyasu, H. Chiba, G. Pupillo, C. Genes, M. Weidemüller, and K. Ohmori, "Ultrafast coherent control of an ultracold Rydberg gas," The 24th International Conference on Atomic Physics, Mayflower Renaissance Hotel, Washington, D. C., USA, August 5, 2014.
5. N. Takei, C. Sommer, H. Goto, K. Koyasu, H. Chiba, G. Pupillo, C. Genes, M. Weidemüller, and K. Ohmori, "Ultrafast coherent control of an ultracold Rydberg gas," Gordon Research Conferences: Quantum Science, Stonehill College, Easton, MA, USA, July 30-31, 2014.
6. C. Sommer, N. Takei, H. Goto, K. Koyasu, H. Chiba, G. Pupillo, M. Weidemüller, and K. Ohmori, "Ultrafast coherent control of an ultracold Rydberg gas," The 11th US-Japan Joint Seminar on Quantum Electronics and Laser Spectroscopy "Ultimate Quantum Systems of Light and Matter- Control and Applications", Nara Prefectural New Public Hall, Nara, Japan, April 4-12, 2013.
7. N. Takei, "Ultrafast coherent control of an ultracold Rydberg gas," A Peter Wall Colloquium Abroad and The 73rd Okazaki Conference on "Coherent and Incoherent Wave Packet Dynamics", Okazaki Conference Center, Okazaki, Japan, November 1, 2013.
8. C. Sommer, "Enhanced pump-probe detection of photoassociated ultracold Rubidium molecules via strong spin-orbit interaction," A Peter Wall Colloquium Abroad and The 73rd Okazaki Conference on "Coherent and Incoherent Wave Packet Dynamics", Okazaki Conference Center, Okazaki, Japan, November 1, 2013.
9. N. Takei, C. Sommer, K. Koyasu, H. Chiba, and K. Ohmori, "Ultrafast coherent control of an ultracold Rydberg gas," Gordon Research Conferences: Quantum Science, Stonehill College, Easton, MA, USA, August 12-17, 2012.
10. C. Sommer, N. Takei, H. Goto, H. Chiba, C. P. Kock, and K. Ohmori, "Enhanced pump-probe detection of photoassociated ultracold Rubidium molecules via strong spin-orbit interaction," The 72nd Okazaki Conference on "Ultimate Control of Coherence", Okazaki Conference Center, Okazaki, Japan, 8-10 January 2013.
11. N. Takei, G. Veshapidze, H. Chiba, K. Koyasu, and K. Ohmori, "Ultrafast coherent control of an ultracold Rydberg gas," Gordon Research Conferences: Quantum Control of Light & Matter, Mount Holyoke College, South Hadley, MA, USA, August 3-4, 2011.
12. N. Takei, G. Veshapidze, H. Chiba, K. Koyasu, and K. Ohmori, "Ultrafast coherent control of an ultracold Rydberg gas", Pushing Frontiers in Quantum Information with Atoms and Photons, Internationals Wissenschaftsforum Heidelberg, Heidelberg, Germany, September 1, 2011
13. K. Koyasu, N. Takei, C. Sommer, H. Chiba, and K. Ohmori, "Ultrafast coherent control of an ultracold Rydberg gas," The Winter School of Asian-Core Program in Beijing: "Self-assembly and Functions of Molecular Materials: Experiment and Theory", Institute of Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, February 20, 2012.
14. N. Takei, G. Veshapidze, H. Chiba, and K. Ohmori, "Ultrafast coherent control of ultracold atoms," Macroscopic Quantum Control Conference on Ultracold Atoms and Molecules," Tokyo, Japan, January 24, 2011.
15. K. Norimatsu, M. Hada, K. Onda, and K. G. Nakamura, "Ultrafast dynamics of photoexcited electrons and coherent phonons in the topological insulator," Pacificchem 2015, Hawaii, USA, December 16, 2015.
16. M. Hada, W. Oba, M. Kuwahara, I. Katayama, T. Saiki, J. Takeda, and K. G. Nakamura, "Femtosecond electron diffraction: the nonthermal dynamics of near-UV photoexcitation-induced amorphization in phase change memory," International Symposium on Ultrafast Intense Laser Science (ISUILS14), Hawaii, USA, December 10, 2015.
17. K. G. Nakamura, S. Hayashi, K. Kato, K. Norimatsu, M. Hada, and Y. Kayanuma, "Quantum interference between electron-phonon coupled states in bulk gallium arsenide," The 19th International Conference on Ultrafast Phenomena, Okinawa, Japan, July 7-11, 2014.

18. K. Norimatsu, S. Uozumi, S. Hayashi, K. Igarashi, S. Yamamoto, T. Sasagawa, and K. G. Nakamura, "Ultrafast phonon dynamics in few-quintuple layer topological insulator Sb_2Te_3 ," The 19th International Conference on Ultrafast Phenomena, Okinawa, Japan, July 7-11, 2014.
19. K. G. Nakamura, S. Hayashi, K. Kato, K. Norimatsu, M. Hada, and Y. Kayanuma, "Quantum coherence in bulk GaAs studied by interference between electron-phonon coupled states," Conference of Laser and Electro-Optics (CLEO/QELS), San Jose, USA, May 8-12, 2014.
20. K. G. Nakamura, H. Katsuki, J. C. Delagnes, K. Hosaka, H. Chiba, E. S. Zijlstra, M. E. Garcia, M. Kitajima, and K. Ohmori, "Optical control and visualization of ultrafast 2D atomic motions in a bulk solid," Gordon Research Conferences, Ultrafast Phenomena in Cooperative Systems, Ventura, CA, USA, February 2-7, 2014.
21. K. Norimatsu, S. Uozumi, K. Igarashi, S. Yamamoto, T. Sasagawa, and K. G. Nakamura, "Dynamics of coherent optical phonons in chalcogenide compounds," CLEO/Europe-IQEC 2013, Munich, Germany, May 12-16, 2013.
22. K. G. Nakamura, S. Harada, and J. Hu, "Selective detection of phonon-plasmon coupled oscillation in indium phosphide using a coherent control technique," CLEO/Europe-IQEC 2013, Munich, Germany, May 12-16, 2013.
23. K. Norimatsu, J. Hu, T. Sasagawa, and K. G. Nakamura, "Dynamics of optical phonons in a Bi_2Se_3 crystal studied using femtosecond time-resolved reflection measurement," the XVIII International Conference on Ultrafast Phenomena, Lausanne, Switzerland, July 9-13, 2012.
24. J. Hu, O. Misochko, and K. G. Nakamura, "Manipulation of squeezed two-phonon bound states using femtosecond laser pulses," the XVIII International Conference on Ultrafast Phenomena, Lausanne, Switzerland, July 9-13, 2012.
25. Y. Kabasawa, J. Hu, T. Sasagawa, and K. G. Nakamura, "Ultrafast quasiparticle dynamics of $\text{FeTe}_{0.75}\text{Se}_{0.25}$ superconductor," the XVIII International Conference on Ultrafast Phenomena, Lausanne, Switzerland, July 9-13, 2012.
26. K. Norimatsu, J. Hu, K. Igarashi, T. Sasagawa, and K. G. Nakamura, "Observation of coherent optical phonon modes in Bi_2Se_3 using femtosecond time-resolved reflection measurement," 6th International Conference on Science and Technology for Advanced Ceramics (STAC6), Yokohama, Japan, June 26, 2012.
27. S. Harada, J. Hu, A. H. Goto, and K. G. Nakamura, "Optical control of coherent LO phonons in p-type InP," 6th International Conference on Science and Technology for Advanced Ceramics (STAC6), Yokohama, Japan, June 26, 2012.
28. Y. Kabasawa, T. Sasagawa, I. Katayama, J. Takeda, M. Kitajima, and K. G. Nakamura, "Ultrafast dynamics of electrons and phonons in iron-based superconductor $\text{FeTe}_{0.75}\text{Se}_{0.25}$," 6th International Conference on Science and Technology for Advanced Ceramics (STAC6), Yokohama, Japan, June 26, 2012.
29. J. Hu, O. V. Misochiko, A. Goto, and K. G. Nakamura, "Delayed formation of coherent phonon-plasmon coupling in GaAs studied using femtosecond optical control technique," The 3rd Shanghai Tokyo Advanced Research Symposium on Ultrafast Intense Laser Science, Odawara, Japan, May 16, 2012.
30. K. Norimatsu, J. Hu, A. Goto, K. Igarashi, T. Sasagawa, and K. G. Nakamura, "Coherent optical phonon measurements of topological insulator Bi_2Se_3 ," The 3rd Shanghai Tokyo Advanced Research Symposium on Ultrafast Intense Laser Science, Odawara, Japan, May 16, 2012.
31. K. Norimatsu, J. Hu, A. Goto, K. Igarashi, T. Sasagawa, and K. G. Nakamura, "Dynamics of coherent phonons in a Bi_2Se_3 crystal," Conference of Laser and Electro-Optics (CLEO/QELS), San Jose, USA, May 6-11, 2012.
32. J. Hu, O. V. Misochko, and K. G. Nakamura, "Control of quantum fluctuation of atomic displacements by femtosecond laser pulses," International Conference on Ultrafast Structural Dynamics (ICUSD), Berlin, Germany, March 19-21, 2012.

33. K. G. Nakamura, H. Koguchi, J. Hu, H. Takahashi, M. Nakajima, S. Utsugi, and H. Funakubo, "Dynamics of coherent optical phonons in PbTiO₃ excited by impulsive stimulated Raman scattering," The 12th International Conference on Multiphoton Processes, Hokkaido, Japan, July 3-6, 2011.
34. J. Hu, O. V. Misochko, N. Takei, K. Ohmori, and K. G. Nakamura, "Direct observation of two-phonon bound state in ZnTe(110)," Joint Conference of 5th International Conference on Science and Technology for Advanced Ceramics (STAC5) and Integration of Novel Structured Metallic and Inorganic Materials (AMDI2), Yokohama, Japan, June 22-24, 2011.
35. T. Eda, H. Koguchi, H. Takahashi, I. Katayama, J. Takeda, Y. Kamihara, and K. G. Nakamura, "Coherent optical phonons in SmFeAsO_{1-x}F_x (x=0.075)," Joint Conference of 5th International Conference on Science and Technology for Advanced Ceramics (STAC5) and Integration of Novel Structured Metallic and Inorganic Materials (AMDI2), Yokohama, Japan, June 22-24, 2011.
36. J. Hu, O. V. Misochko, K. Ohmori, and K. G. Nakamura, "Coherent control of phonon localization in ZnTe(110) using femtosecond laser pulses," CLEO 2011, Baltimore, USA, May 2-6, 2011.
37. Y. Kayanuma and K. G. Nakamura, "Ultrafast Control of Electron-Phonon Entangled Systems in Bulk Solids," 19th International Conference on Ultrafast Phenomena, Okinawa Japan, July 7, 2014.
38. Y. Kayanuma, Y. Mizumoto, Y. Mori, G. Oohata, and K. Mizoguchi, "What are we observing by the detection frequency resolved measurement of the coherent phonons?," CLEO/Europe-IQEC 2013, Munich, Germany, May 12, 2013.
39. Y. Kayanuma and Y. Mizumoto, "Coherent Control of Quantum Dynamics of Bloch Electrons by Intense Oscillatory Field," Tenth International Conference on Excitonic Processes in Condensed Matter, Nanostructured and Molecular Materials, Groningen, Netherland, March 7, 2012.
40. Y. Kayanuma, "Role of a nontrivial quantum phase in the coherent dynamics of Bloch electrons under oscillating field," 10th International Symposium on Ultrafast Intense Laser Science, Eisenach, Germany, October 18, 2011.
41. Y. Kayanuma, "Quantum betatron as a new source of terahertz radiation," 11th International Conference on Luminescence, Ann Arbor, USA, June 28, 2011.
42. Y. Kayanuma, "Quantum Betatron," International Symposium Nanoscience and Quantum Physics 2011, International House of Japan, Minato-ku, Tokyo, January 27, 2011.
43. Y. Kayanuma, "Coherent Manipulation of Fundamental Electronic Properties of Matter by an Intense Oscillating Field," International Symposium on Ultrafast Intense Laser Science, Maui, USA, December 11, 2010.

(4)知財出願

なし

(5)受賞・報道等

①受賞

1. * フンボルト賞 (Humboldt Research Award)、大森賢治、2012 年 6 月 20 日
2. STAC6 Best Poster Awards、Y. Kabasawa, T. Sasagawa, I. Katayama, J. Takeda, M. Kitajima, and K. G. Nakamura、June 26 (2012)
3. 東京工業大学応用セラミックス研究所長賞 (研究業績部門)、中村一隆、2011 年 10 月 19 日
4. ベストポスター賞 (Joint Conference of 5th International Conference on Science and Technology for Advanced Ceramics (STAC5) and Integration of Novel Structured Metallic and Inorganic Materials (AMDI2))、江田恭之、2011 年 6 月 23 日

②マスコミ(新聞・TV等)報道

1. Nature Japan, 注目の論文「ビスマス単結晶中の超高速二次元原子運動の全光学的制御と可視化」2013 年 11 月 (<http://www.natureasia.com/ja-jp/ncomms/abstracts/50595>)
2. 朝日新聞「原子振動、自在に」2013 年 11 月 20 日朝刊
3. 中日新聞「10 兆分の 1 秒で原子制御」2013 年 11 月 19 日朝刊
4. 日刊工業新聞「原子 2 次元運動制御」2013 年 11 月 19 日朝刊
5. 東海愛知新聞「固体中の原子運動、光技術で画像化」2013 年 11 月 19 日朝刊
6. 中日新聞「脳科学のフロンティア 社会脳と脳」2013 年 2 月 9 日朝刊
7. 熊本日々新聞「研究者目指す学生へ 独「フンボルト賞」受賞 大森賢治教授に聞く」2012 年 9 月 3 日朝刊
8. 熊本日々新聞「大森教授に独フンボルト賞」2012 年 6 月 6 日朝刊
9. 中日新聞「分子コンピューター 独フンボルト賞に」2012 年 5 月 23 日朝刊
10. 朝日新聞「分子研の大森教授 フンボルト賞」2012 年 5 月 18 日朝刊
11. Nature Photonics Research Highlights, Quantum interference, July 2011
12. 小学館 DIME「能力は最速スパコンの 1000 倍以上!?「分子コンピューターが世の中を変える」」6 月 21 日
13. Nature Physics News and Views, Wave packets get a kick, May 2011
14. 科学新聞「分子1個で任意の超高速演算が可能～分子研が新しい光技術開発～」4 月 15 日
15. 日刊工業新聞「分子1個で高速演算～分子研、光技術を開発～」4 月 11 日
16. 中日新聞「超高速処理へ物理現象発見～スパコン能力の 1000 倍～」4 月 11 日

③その他

1. CBC テレビ 夕方ニュース「イッポウ」、大森賢治教授がフンボルト賞受賞、2012 年 5 月 24 日

§ 5 研究期間中の活動

5. 1 主なワークショップ、シンポジウム、アウトリーチ等の活動

年月日	名称	場所	参加人数	概要
H27 年 8 月 6-8 日	チーム内ミーティング (非公開)	分子科学研究所	6 人	研究進捗報告のためのミーティング (量子シミュレーター班)
H27 年 4 月 2-4 日	チーム内ミーティング (非公開)	分子科学研究所	6 人	研究進捗報告のためのミーティング (量子シミュレーター班)
H27 年 1 月 29 日	チーム内ミーティング (非公開)	分子科学研究所	3 人	研究進捗報告のためのミーティング (バルク固体班)
H27 年 1 月 8-10 日	チーム内ミーティング (非公開)	分子科学研究所	6 人	研究進捗報告のためのミーティング (量子シミュレーター班)
H26 年 8 月 4-8 日	チーム内ミーティング (非公開)	分子科学研究所	6 人	研究進捗報告のためのミーティング (量子シミュレーター班)
H26 年 7 月 24 日	チーム内ミーティング (非公開)	分子科学研究所	4 人	研究進捗報告のためのミーティング (バルク固体班)

H26 年 5 月 20-21 日	チーム内ミーティング (非公開)	東京工業大学 すずかけ台キャンパス	4 人	研究進捗報告のためのミーティング (バルク固体班)
H26 年 4 月 9 日	チーム内ミーティング (非公開)	東京工業大学 すずかけ台キャンパス	4 人	研究進捗報告のためのミーティング (バルク固体班)
H26 年 4 月 2-5 日	チーム内ミーティング (非公開)	分子科学研究所	6 人	研究進捗報告のためのミーティング (量子シミュレーター班)
H26 年 3 月 20 日	チーム内ミーティング (非公開)	東京工業大学 すずかけ台キャンパス	8 人	研究進捗報告のためのミーティング (チーム全体)
H26 年 3 月 6 日	チーム内ミーティング (非公開)	分子科学研究所	3 人	研究進捗報告のためのミーティング (バルク固体班)
H26 年 2 月 19-22 日	チーム内ミーティング (非公開)	分子科学研究所	4 人	研究進捗報告のためのミーティング (バルク固体班)
H26 年 1 月 13-16 日	チーム内ミーティング (非公開)	フランス・ストラスブール大学	3 人	研究進捗報告のためのミーティング (量子シミュレーター班)
H25 年 11 月 20 日	チーム内ミーティング (非公開)	東京工業大学 すずかけ台キャンパス	5 人	研究進捗報告のためのミーティング (バルク固体班)
H25 年 8 月 29-31 日	チーム内ミーティング (非公開)	分子科学研究所	4 人	研究進捗報告のためのミーティング (量子シミュレーター班)
H25 年 8 月 4-7 日	チーム内ミーティング (非公開)	分子科学研究所	4 人	研究進捗報告のためのミーティング (量子シミュレーター班)
H25 年 5 月 16-18 日	チーム内ミーティング (非公開)	分子科学研究所	4 人	研究進捗報告のためのミーティング (量子シミュレーター班)
H25 年 4 月 1-3 日	チーム内ミーティング (非公開)	分子科学研究所	4 人	研究進捗報告のためのミーティング (量子シミュレーター班)
H25 年 3 月 13-16 日	チーム内ミーティング (非公開)	分子科学研究所	4 人	研究進捗報告のためのミーティング (量子シミュレーター班)
H25 年 2 月 13-16 日	チーム内ミーティング (非公開)	分子科学研究所	4 人	研究進捗報告のためのミーティング (量子シミュレーター班)
H25 年 2 月 1 日	チーム内ミーティング (非公開)	東京工業大学 すずかけ台キャンパス	4 人	研究進捗報告のためのミーティング (バルク固体班 + 理論班)
H24 年 12 月 9-12 日	チーム内ミーティング (非公開)	分子科学研究所	4 人	研究進捗報告のためのミーティング (量子シミュレーター班)
H24 年 10 月 25-29 日	チーム内ミーティング (非公開)	分子科学研究所	4 人	研究進捗報告のためのミーティング (量子シミュレーター班)
H24 年 8 月 23-25 日	チーム内ミーティング (非公開)	分子科学研究所	4 人	研究進捗報告のためのミーティング (量子シミュレーター班)
H24 年 8 月 3 日	超高速現象研究会	東京工業大学 すずかけ台キャンパス	12 人	超高速現象に関する研究会
H24 年 7 月 27 日	チーム内ミーティング (非公開)	東京工業大学 田町キャンパス	10 人	研究進捗報告のためのミーティング (チーム全体)

H24 年 7 月 3-7 日	チーム内ミーティング(非公開)	分子科学研究所	4 人	研究進捗報告のためのミーティング(量子シミュレーター班)
H24 年 6 月 12 日	チーム内ミーティング(非公開)	東京工業大学 すずかけ台キャンパス	4 人	研究進捗報告のためのミーティング(バルク固体班+理論班)
H24 年 5 月 28-31 日	チーム内ミーティング(非公開)	分子科学研究所	4 人	研究進捗報告のためのミーティング(量子シミュレーター班)
H24 年 3 月 29 日	チーム内ミーティング(非公開)	分子科学研究所	2 人	研究進捗報告のためのミーティング(量子シミュレーター班+理論班)
H24 年 2 月 17 日	チーム内ミーティング(非公開)	東京工業大学 すずかけ台キャンパス	7 人	研究進捗報告のためのミーティング(バルク固体班+理論班)
H23 年 8 月 25 日	チーム内ミーティング(非公開)	分子科学研究所	5 人	研究進捗報告のためのミーティング(バルク固体班)
H23 年 7 月 29 日	超高速計測ミニ研究会	東京工業大学 すずかけ台キャンパス	15 人	固体のフェムト秒時間分解計測に関する研究会
H23 年 4 月 13 日	チーム内ミーティング(非公開)	分子科学研究所	3 人	研究進捗報告のためのミーティング(バルク固体班)
H23 年 3 月 4 日	チーム内ミーティング(非公開)	東京工業大学 すずかけ台キャンパス	4 人	研究進捗報告のためのミーティング(バルク固体班+理論班)
H23 年 2 月 21 日	チーム内ミーティング(非公開)	分子科学研究所	5 人	研究進捗報告のためのミーティング(バルク固体班)
H23 年 1 月 13 日	チーム内ミーティング(非公開)	分子科学研究所	5 人	研究進捗報告のためのミーティング(バルク固体班)
H22 年 11 月 12 日	チーム内ミーティング(非公開)	東京工業大学 すずかけ台キャンパス	14 人	研究進捗報告のためのミーティング(チーム全体)

§ 6 最後に

研究の目標等から見た達成度:

本 CREST 研究では、我々の極限的な超高速コヒーレント制御と絶対零度付近の極低温リュードベリ原子集団を組み合わせた全く新しい「超高速量子シミュレーター」を開発し、そこで得られた量子多体系の観測制御スキームを実在のバルク固体に応用することによって、凝縮系のコヒーレント制御を格段に発展させる方法論の確立を目標にした。研究チームは量子シミュレーター部分を担当する量子シミュレーター班と、バルク固体部分を担当するバルク固体班から構成され、これら二つの研究班の双方向のフィードバックに基づく新しい研究形態の確立を目指してきた。

5 年前の研究開始時点では、磁気光学トラップ中の極低温 Rb 原子集団を光格子に導入して得られた規則正しい原子結晶を超高速量子シミュレーターの最終形とする予定であったが、格子欠陥のない原子結晶を作る為には、磁気光学トラップ中の Rb 原子密度では不十分で、代わりに Rb 原子の BEC を光格子に導入する必要があることが CREST 研究開始後に判明した。そこで急遽そのように方針を転換し、そのための新しい実験システムの構築を 1 から進め、それを完成させるとともに、既に BEC を発生させ光格子に導入する事に成功している。これによって間もなく欠陥のない光格子原子結晶を作成する見込みが立った。

上記の光格子原子結晶の準備と平行して、光双極子トラップ(光ピンセット;BEC の前段階)中の不規則に配列した極低温 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の開発を進めた。本開発は、前例のない発想と実験装置・手法に基づくものであり、さらに観測結果の解釈のために新しい理論モデルの構築を必要としたため、予想し得ない数々の問題点を一から自力で解決して行く必要があったが、昨年度ついにそれらの問題点をすべて克服し、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。ここでは、これまでの極低温リュ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、広帯域のパルスレーザーを導入するという独自の手法によって、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電子ダイナミクスをアト秒精度で観測・制御することに成功している。この成果の強力な波及効果は既に世界的に浸透しつつあり、例えば昨年从今年にかけて、原子物理 Gordon 会議など欧米を中心とした主要国際会議において 10 件の招待講演を依頼されるなど、世界的な注目を集めている。

5 年前の研究開始当初、超高速量子シミュレーターにおける多体相互作用の強度は、以下の 3 つの方法で調節できると見込んでいた:1)レーザー波長を変えることによってリュードベリ電子軌道の空間的な広がり(主量子数)を調節する;2)レーザー強度を変えることによってリュードベリ状態のポピュレーションを調節する;3)レーザーパルスを整形することによってリュードベリ電子波動関数の形状を調節する。上記のプロトタイプにおいて、これらすべてのチューニングノブが想像以上に敏感に動作する事も実証する事が出来た。

一方、バルク固体班による GaAs 単結晶のコヒーレント制御実験において、結晶内のプラズモンのコヒーレンス寿命がキャリア電子密度に依存するという興味深い現象が観測されていた。この現象を超高速量子シミュレーター・プロトタイプによって検証したところ、キャリア電子密度が上がる事によって電子の多体相関が強くなり、その結果、波動関数の位相緩和が加速される事が原因であるとわかった。そこで、この検証結果をバルク固体班にフィードバックし、GaAs 単結晶における電子コヒーレンス寿命のキャリア電子密度依存性の測定を開始した。現在、低温での詳細な測定を進めている。このように、研究開始当初思い描いていた量子シミュレーター班とバルク固体班の双方向のフィードバックに基づく全く新しい研究形態が、極めて複雑な量子多体問題を解く上で非常に有効であることを実証する事が出来た。

バルク固体班では、その他にも超高速量子シミュレーターで検証すべき新現象の探索を進めて来たが、その途上で、様々な固体結晶中で非局在化した分子振動や格子振動およびそれらが電子と結合した状態の超高速量子多体ダイナミクスの観測と制御にも成功している。

以上述べたように、多少の計画変更はあったが、本 CREST 研究開始時点には世界のどこにも存在せず、誰も発想していなかった超高速量子シミュレーターを実現させ、当初期待していた 3 つの調節機能がすべて予想を超えた感度で動作する事を実証したこと、また、この超高速量子シミュレーターで量子-古典境界を探索する為に必要な熱ノイズをモデル化する全く新しい光技術を開

発したこと、およびこの超高速量子シミュレーターと実在のバルク固体実験の双方向フィードバックに基づく新しい研究形態が量子多体問題を解く上で非常に有効であることを実証する事が出来たこと、さらには、この双方向性を実証する途上において、様々な固体結晶中で非局在化した波動関数のコヒーレント制御を実現させたことなど、研究開始当初に設定した重要なコンセプトのすべてと、それらを機能させる為に必要な新しい理論モデルを想定以上のレベルで実証した点において、当初の予想を超える達成度であったと結論する。

得られた成果の意義：

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化学反応に至るまで、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問題によって支配されている。しかし、このような強相関係の量子多体問題を現在のコンピュータで解くことは極めて難しい。例えば、多体系を記述する最も単純な近似の一つである Hubbard 模型の定常解を求める場合、2020 年頃に完成するポスト「京」コンピュータであっても 30 粒子以上を扱うことは不可能であり、仮に 1000 粒子であれば計算時間は 10 の 126 乗年と推定される。しかも、機能性を光など外部からの刺激で制御する場合には、刺激を与えた後の非定常な時間発展（ダイナミクス）を知る必要があるが、ダイナミクスの計算は定常解を求めるより格段に難しい。本 CREST 研究では、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ができる「超高速量子シミュレーター」の開発を進め、ついにそのプロトタイプを完成させた。この超高速量子シミュレーターは「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「超高速電子運動をアト秒精度でコヒーレント制御する光技術」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で初めて実現する技術であり、新しい機能性材料や薬剤分子等を開発する上で、スーパーコンピュータを基盤とする現在の最先端シミュレーションツールを一新する革新的なシミュレーションプラットフォームとして期待される。実際、本 CREST 研究において、「GaAs 結晶内のプラズモンのコヒーレンス寿命が励起強度に依存する」という極めて複雑な現象の原因が電子の多体相関による位相緩和に起因する事を超高速シミュレーター実験で明らかにした意義は特筆に値する。

また近年、先進各国の科学技術政策では量子テクノロジーの開発に莫大な予算が投入されている。例えば、英国では 2014 年から 5 年間で 500 億円を量子テクノロジーの開発に投入する巨大プロジェクトが始まった。日本でも、文科省の科学技術・学術審議会において、量子テクノロジーに関する政策課題を議論する量子科学技術委員会が今年の 6 月に発足した。その中でも特に重要課題の一つである量子シミュレーターの開発競争において、我が国で超高速量子シミュレーターが開発された意義は極めて大きい。

今後の研究の展開：

上記のプロトタイプでは光双極子トラップ（光ピンセット；BEC の前段階）中の不規則に配列した極低温 Rb 原子集団を使ってシミュレーション実験を行っている。今後はこのプロトタイプを光格子に導入することによって、規則正しく配列した原子結晶を対象に超高速量子シミュレーション実験を行う。

また、上記の GaAs 結晶内のプラズモンコヒーレンス以外にも、バルク固体実験で観測される興味深い多体現象を超高速量子シミュレーターによって検証する。

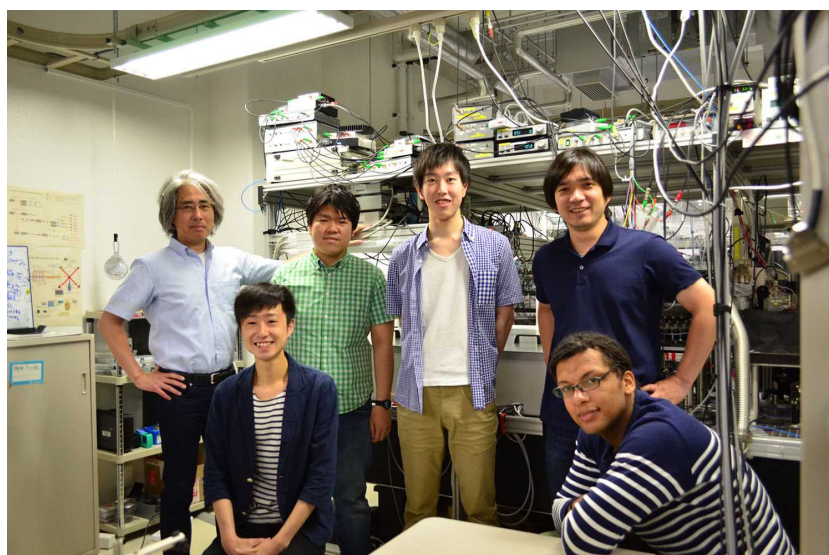
研究代表者としてのプロジェクト運営について：

本 CREST 研究の申請時点には世界のどこにも存在せず、誰も発想していなかった「超高速量子シミュレーター」を開発するという極めてリスクの高い研究課題の価値を認めていただき、5 年間の長きに渡って力強いサポートと粘り強く親身な御指導をいただいた伊藤総括、領域アドバイザーの先生方、そして前野さん、藤田さんを始め JST のみなさんに心から感謝致します。おかげで、超高速量子シミュレーターという全く新しい概念を実現する事が出来ました。また、実り多い共同研究の

チャンスを与えてくれた中村グループのみなさん、萱沼グループのみなさん、Weidemüller 教授 (Heidelberg 大学)、Pupillo 教授 (Strasbourg 大学)、Genes 独立上級研究員 (Innsbruck 大学) にたいへん感謝しています。



分子研大森グループのメンバー



BEC 生成の成功を記念して



ストラスブールにて。Guido Pupillo 教授(右から 3 人目)と大森賢治教授(右から 2 人目)。
右端はストラスブール大学を代表する教授の一人である Thomas Ebbesen 教授。



ハイデルベルグにて。Matthias Weidemüller 教授と大森賢治教授。



東工大中村グループのメンバー