

シンポジウム (T-5) 開催報告

自在な量子制御に向けた光 = 物質強結合系の科学

Sciences of Strong Light-Matter Interaction for Tailored Quantum Manipulation

2023年3月15日(水) 13:30 ~ 18:00 A304 会場

レーザー技術の大幅な進展と、エレクトロニクスをはじめとした微細加工技術の発展により、近年、光と物質の相互作用を制御する研究が盛んに行われています。特に、共振器などを用いて、光と物質を強く結合させ、物質の量子状態そのものを変調させる研究やその応用、また、光電場によって物質が駆動される現象を活用した物性制御などの研究が注目されます。これらの光と物質が強く結合した領域では、従来の光励起過程とは異なる物理が現れることから、これまでにない、新たな量子状態制御が可能になることも少しずつですがわかってきています。そこで本シンポジウムでは、このような新しい光と物質の相互作用を活用した研究について、理論、基礎物理、応用のそれぞれの側面から概観し、光-物質強結合系の持つ新たな可能性を探索し、今後の研究の方向性を概観することを目指しました。

<講演内容>

[15p-A304-1] 13:30~13:35 はじめに

「はじめに」では、本シンポジウムの企画趣旨などについて簡単に述べました。特に量子状態を自在に制御することは、自然科学の重要な目標の一つであり、量子計算や化学反応、デバイス物理、物性制御、エレクトロニクス、光加工等各分野への応用につながるものと考えられます。そこで、これらの応用を見据えた光と物質の相互作用に関する研究を概観するとともに、それぞれの最先端で、どのような制御が目指されているのか、また、強電場や強結合を活用して何ができるのか、について議論したいということを書きました。

[15p-A304-2] 13:35~14:05 量子スピード限界で動作する冷却原子型・超高速量子コンピュータ

大森賢治 (分子科学研究所)

はじめに、超短パルスレーザーを利用して、トラップ原子の量子状態を走査し、量子コンピュータへと応用する研究が紹介されました。特に冷却原子系では非常に多くの量子ビットをつまんで動かすことができ、その位置を精密に制御することで相互作用を調整することができることから、量子計算のプラットフォームとして非常に有望であることが述べられました。実際に実験では、高いリユードベリ状態に励起した原子対に光励起を施すことで、ナノ秒程度の非常に速い時間スケールでの量子ゲート走査が実現できることが示されました。量子計算の分野では、相互作用の制御が非常に重要な役割を担うことがわかる非常に興味深い講演でした。

[15p-A304-3] 14:05~14:35 熱平衡下の量子制御に向けた光と物質の超強結合

馬場基彰 (京都大学)

続いて、光と物質の強結合状態を極限まで追求し、熱平衡下での量子状態制御を目指した、理論的な研究

が紹介されました。超放射相転移と呼ばれる、基底状態で光の場が相転移を起こし有限の値を取る転移について理論的な検討の報告がなされ、その中で、電子双極子を利用した相転移は、ハミルトニアンベクトルポテンシャルの二乗の項の寄与によって起こりにくいが、磁気双極子を用いた場合にはこの制約を回避することができることが述べられました。実際に実験との対比もあり、相転移以下ではゆらぎが大きくなるということが理論的に提案されており今後の実証研究にも期待がもたれます。本手法を用いればマクロな量子状態の制御が可能であり、量子計算や量子制御への適用が今後期待されることをうかがわせる内容でした。

[15p-A304-4] 14:35~15:05 ナノ構造半導体における量子コヒーレンスと光電機能

田原弘量 (京都大学)

さらに、物質の量子状態の側をナノスケールとし、強い閉じ込め効果を活用して光電変換へと応用するための基礎物理の解明に関する報告がなされました。位相を制御したパルス列を用いることで、ナノ半導体中の励起子が生成する高調波の信号を解析することができ、それにより量子協力効果が表れ得ることを明らかにしたものです。ナノ粒子は、物質側の量子状態を精密に制御することのできるものであり、例えば、室温で100%に近い発光効率を実現することも可能であるなど注目されています。本実験で明らかにされた量子コヒーレンスを今後、強結合系へと展開することで、新たな光電機能の発現方法が明らかになることが期待される内容でした。

[15p-A304-5] 15:05~15:35 磁性ヘテロ構造薄膜の超高速スピン制御

飯浜賢志 (東北大学)

次に磁性体の薄膜を、光を用いて励起することによって、超高速のスピン制御を行う実験的な研究が紹介されました。物質系は、誘電性から磁性まで多様であるが、光の側も波長や偏光など、多様な自由度を持ち、これらをうまく制御していくことで、光とスピンを融合した研究が展開できることが示されました。特にスピンの歳差運動の位相を精密に解析することにより、円偏光誘起スピンの効果を定量的に評価できることが示されており、スピントロニクス分野でも超高速制御に向けた研究が進みつつあることを明らかにしていると思われます。

[15p-A304-6] 15:50~16:20 シフトカレントと量子物質制御

小川直毅 (理化学研究所)

後半は、量子物質の応答の一つとして、シフトカレントがどのような条件で現れるかに関する最新の研究が紹介されました。シフトカレントとは、波数空間の非対称性によって生じる、電荷のシフトのことを表しており、そのメカニズムが非常に注目されているところです。電子状態の対称性が電流応答としてマクロに取り出される点で非常に興味深く、量子物質のトポロジーの解明のための強力な手法となり得ることが示されました。テラヘルツから赤外領域の応答が物性の量子特性の解明につながり、制御につながる可能性もあるという点で、興味深い講演でした。

[15p-A304-7] 16:20~16:50 強レーザー電場下におけるアト秒電子ダイナミクスの第一原理的解析

佐藤駿丞 (筑波大学)

次に光電場駆動の時間応答を第一原理計算によって解明する研究が紹介された。特に Ti における内核遷移や、磁性金属の応答などが理論的に明らかにされてる様が報告されました。実験とも良い一致を示している点で強力な手法であることが紹介されています。数値計算では、計算結果から電子状態変化詳細な推移を解析することが可能であり、この点でも、今後の光-物質強結合系の理解において、重要な位置を占めるものと期待される内容でした。

[15p-A304-8] 16:50~17:20 超伝導体、強相関電子系におけるペタヘルツ電子駆動

岩井伸一郎（東北大学）

更に、短パルスのレーザーを用いて強相関電子系を駆動し、強電場での電荷駆動やその熱化のダイナミクスが紹介されました。独自の広帯域超短パルスレーザーによって駆動される現象は物質によって多様であり、二次高調波発生や非線形信号の、パルスの位相に依存した応答など様々な興味深い現象が報告されていました。まだ完全な解明には至っていないとのことでしたが、本手法による計測の対象も、誘電体から超伝導体、磁性体と幅広く、超高速領域で生じる現象には、様々な興味深い特性が現れることがわかりました。

[15p-A304-9] 17:20~17:50 フェムト秒レーザー加工の光制御

谷峻太郎（東京大学）

最後に、強いレーザー電場を印加する状況としては極限的な現象にあたる、レーザー加工のダイナミクス研究の最先端についてご講演をいただきました。レーザー加工の初期過程では光と物質が強く相互作用しているが、この初期過程によってどの程度励起過程を制御できるのかが重要な課題として研究されていることがわかりました。特にレーザー加工は様々な現象がマルチスケールに起こることから、その解釈が難しい現象として知られています。しかしながら、近年の計測技術や深層学習技術の進展により、そのメカニズムが徐々に解きほぐされつつあることが報告されていました。今後、加工の制御に向けた研究が活性化する、契機となるような研究でした。

<おわりに>

本シンポジウムでは、光と物質が強く結合した系として、共振器やナノ構造を利用した系や、強い光電場と物質が相互作用する系について各方面の最先端を研究する研究者にご講演いただきました。どの講演も非常にレベルが高く、刺激的なシンポジウムとなったのではないかと考えています。実際に現地とオンラインの会場を合わせて常時 150 人程度の聴講者が参加し、活発に意見交換が行われていました。見られる現象は様々なエネルギースケールのものがあり、関係する光の波長や強さも様々ではありましたが、同時に類似している部分もあることも見て取れたのではないかと思います。光と物質が強く結合する系を通じた量子状態の制御は、今後さらに発展していくものと期待させるシンポジウムであったと言えます。このような研究領域の取り組みを通して新しいアプリケーションや物理現象を見つけ出ししていくには、引き続き分野融合の取り組みを進め、海外をも巻き込みながら研究を進めていく必要があると感じました。

世話人：片山郁文（横浜国大）、廣理英基（京都大学）、佐藤琢哉（東京工業大学）、
芦原聡（東京大学）、岡隆史（東京大学）、岡野真人（防衛大学校）