

空間的に離れた物質間に光が創り出す量子もつれ状態

[1] 要旨

空間的に離れた二つの系の光による量子もつれ生成・制御は、光誘起相転移の初期量子ダイナミクスの解明や量子情報通信技術の基盤確立などに向けての非常に基本的な理論的課題である。本研究では、光の量子効果により空間的に離れた物質系のフォノン間に量子もつれ状態ができる過程のダイナミクスを、数値計算を用いて示すことに成功した。量子もつれ生成機構が明らかになったことにより、光と物質が一体となって新しい物質相を形成する現象の理解が進むと考えられる。

[2] 本文

光誘起相転移は、物質の電子状態や結晶構造が、極短パルス光照射によって過渡的に変化する現象である。特に強相関電子系や強結合電子・格子系の示す多彩な量子状態を時間領域で観測し、非平衡状態で主要な役割を担う素励起のダイナミクスを明らかにすることが、この現象の理解・制御のために重要なポイントである。実験的には、近年のレーザー技術の進展を基盤とした観測技術の進歩により、精密かつ多様な実験手段が得られるようになり、電子状態・結晶構造などさまざまな側面からフェムト秒スケールの量子ダイナミクスが明らかにされようとしている。理論的研究においても、フロッケ・エンジニアリングやテンソルネットワークを用いた電子相関理論、非平衡統計力学の発展に伴う前期熱化現象などの多彩な結果が蓄積されてきている。

上記の一連の理論研究において、光は古典的な電磁場として取り扱われているが、コヒーレントなドメイン形成過程や、基底状態相図には本来的に出現しない多体的・非局所的過渡状態を正しく記述するためには、量子化された光（光子）と物質系が相互作用する状況下での電子相関を取り扱うことが必要となる。これまでは光の量子性の検討が積極的に必要になる問題はあまり俎上に上がってこなかったが、過渡領域での非平衡状態と量子もつれの関係性が物理の基礎問題としても理解が深まる現在、詳しく取り扱うべき問題である。

最近、宇都宮大学と東北大学の共同研究グループは、空間的に離れた2つの電子・格子系に量子光を照射することにより、両者の格子振動（フォノン）間に量子もつれが形成される過程の詳細を初めて明らかにした。この成果は、JPSJの2021年10月号に掲載された。

空間的に十分離れた二つの物質は、それぞれ独立に振る舞うことから、直接的な量子力学的な相関は両者の間には存在しないと考えてよい。しかし、これらに光（電磁波）を照射することによって両者の間に量子もつれが生成されることが、マイクロ波を用いた実験などで示されており、その生成機構を理論的に解明することは、離れた物質間だけでなく物質内での量子もつれ生成、さらには光誘起相転移における素過程の解明にも繋がる重要な問題である。

本研究では、フォノンをラマン散乱の機構で励起するモデルを取り扱い、2つの物質系に量子光（光子）を照射することによる状態の変化を、時間依存シュレーディンガー方程式を数値解法することによって求めた。量子もつれの指標として量子相互情報量を用いた計算の結果、光吸収量などの個々の物質系の性質で決まる物理量は、量子光と古典光による理論がほぼ同じ結果を与えるにもかかわらず、量子光が両者間に生成する量子もつれは無視できない大きさであることが分かった（図1）。これは、従来の光学測定では無視できるように見える場合でも、実は系の内部で生

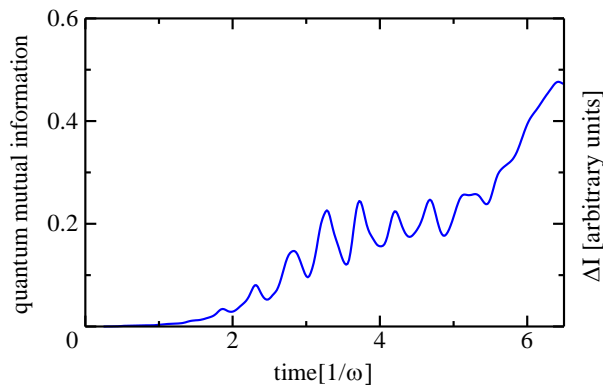


図1 量子相互情報量の時間変化
(ω はフォノンの角振動数)

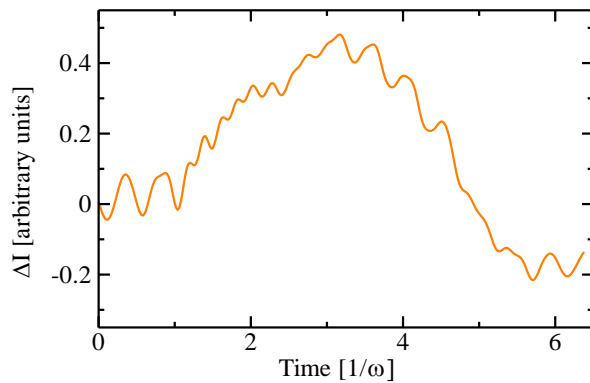


図2 フォノン間量子もつれに由来する
光学応答の時間変化 (ω はフォノンの角
振動数)

じる量子もつれが系の状態に重要な役割を果たすことを示唆している。特に相転移近傍では、こうした量子もつれによって誘起された微小なゆらぎが系のダイナミクスに大きな影響を与えるため、注意深い取り扱いが必要となる。

さらに本研究では、こうした量子もつれを実験的に観測する手段についても検討を行なった。散乱光の複素振幅についてハイゼンベルグの運動方程式を用いた解析を行なった結果、散乱光に量子もつれの情報が反映されていることを見出した。これは、時間分解分光においてコヒーレントフォノンとして知られる信号が、量子もつれによって正弦波からわずかにずれる現象として観測されることを示しており、本研究ではこの「ずれ」の時間依存性についても求めている (図2)。

本研究成果は、量子光が多体系の物性に与える影響について調べた最初の研究であると同時に、いずれ量子情報通信分野の研究とも深い関連が出てくるであろうと予想される。なぜなら、上記の理論的フレームワークは、空間的に離れた量子ビット系に量子もつれを生成したり情報を伝送したりという、量子情報通信の基本的問題と類似のモデルで記述されるためである。具体的には、遠く離れた量子ビットや物質間に光照射によって量子もつれを生成する過程は、量子メモリとしての用途が考えられる。このとき物質中のフォノンが大きな自由度を持つことから、フォノン間にはより大きな量子もつれが生成されることが期待され、有効な量子もつれ貯蔵手段としての可能性がある。

電子系が格子振動や光子といったボソンと結合した量子多体系の解析は、古くからの歴史もあり、量子計算の性能保証の問題などにも表われつつある古くて新しい問題であると同時に、今後さらに詳細な検討が進むことが期待される。

原論文(10月1日公開済)

[Two-step Dynamics of Photoinduced Phonon Entanglement Generation between Remote Electron-Phonon Systems](#)

[Kunio Ishida and Hiroaki Matsueda, J. Phys. Soc. Jpn. **90**, 104714 \(2021\).](#)

<情報提供 石田邦夫 (宇都宮大学)
松枝宏明 (東北大学) >