

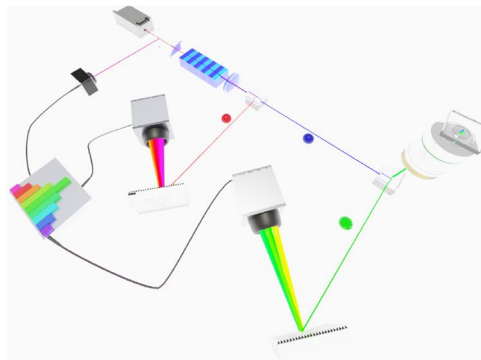
配信先：大学記者会（東京大学） 文部科学記者会 科学記者会

2026年4月16日
国立大学法人東京大学
国立大学法人電気通信大学

量子もつれ光子を利用した時間分解分光法の提唱 ——高い選択励起性をもつ時間分解分光計測実現への重要な一歩——

発表のポイント

- ◆既存の単一光子検出技術で実装可能な、量子もつれ光子対を用いた時間分解量子分光法を提唱しました。
- ◆複数の超短レーザーパルスの精密な遅延制御を用いずに二次元スペクトル情報を取得でき、従来より簡素な分光計測系を実現できる可能性を示しました。
- ◆蛍光光子と量子もつれ光子の同時計数検出によって、量子もつれ光子対に由来する事象を選択的に抽出し、量子相関の利点を時間分解分光へ現実的に導入できる道筋を示しました。



本研究で提案した時間分解量子分光法の概念図

概要

東京大学大学院理学系研究科の藤橋裕太特任助教、石崎章仁教授と、電気通信大学大学院情報理工学研究科基盤理工学専攻博士前期課程2年（研究当時）の磯大空氏、同専攻清水亮介教授の共同研究チームは、既存の単一光子検出技術で実装可能な、量子もつれ光子対を用いた新しい時間分解量子分光法を提唱しました。本研究では、この量子分光法が主に二つの利点をもつことを理論的に示しました。

第一に、量子もつれ光子対がもつ時間・周波数相関を利用することで、従来の古典光による二次元分光法で必要とされてきた複数の超短レーザーパルスの精密な遅延制御を行わなくても、二次元スペクトル情報を取得できます。第二に、信号検出に蛍光を用いるため、従来の四光波混合に基づく二次元分光計測で問題となりがちな、複数の非線形光学過程の寄与が混在した複雑な信号ではなく、誘導放出に相当する成分を選択的に取り出せることを示しました。

本研究成果は、時間分解分光計測において量子相関の利点を現実的な形で活用するための新たな道筋を示すものであり、高い選択励起性をもつ時間分解分光計測の実現に向けた重要な一歩といえます。

本研究成果は、2026年4月17日14時(米国東部夏時間)に米国科学誌「Science Advances」にオンライン掲載されます。

発表内容

量子もつれ(注1)は、1935年にエルヴィン・シュレーディンガーが指摘したように、量子力学を特徴づける本質的な性質の一つです。アルベルト・アインシュタインが“Spooky action at a distance(薄気味悪い遠隔作用)”と忌み嫌ったこの性質は、過去数十年にわたり、量子通信・量子計算の発展を支える重要な資源として研究されてきました。近年は量子光学技術の進展により、量子もつれ光子対(注2)がイメージング、顕微鏡法、分光法などの新しい計測技術を実現する資源としても注目されています。分光分野では、量子もつれ光子対を利用することで、ショット雑音以下での吸収分光や、可視光検出による赤外分光など、古典光では得られない利点が提案・実証されてきました。こうした成功例を背景に、量子もつれ光子対を二次元分光法(注3)などの時間分解分光計測へ応用し、レーザーなどの古典光では達成が難しい高感度化や選択励起を目指す理論研究が進められてきました。しかし、従来提案されてきた多くの手法では、非線形光学応答を引き起こすために、量子もつれ光子対の両方を分子と相互作用させる必要がありました。その結果、得られる信号は極めて微弱となり、現状の単一光子検出技術だけでは実験的実装が難しいという課題がありました。

今回、研究チームは、既存の単一光子検出技術の範囲で実装可能な、量子もつれ光子対を利用した二次元蛍光分光法を理論的に提唱しました。本提案で想定する光学系の概略を図1に示します。まず、パルスレーザーを非線形結晶に入射し、自発的パラメトリック下方変換(注4)によって量子もつれ光子対を生成します。生成された光子対は偏光ビームスプリッター(PBS)で分離され、一方の光子(シグナル光子)は分子サンプルの励起に用いられます。サンプルから放出された蛍光光子と、もう一方の光子(アイドラー光子)との間で二光子同時計数検出を行います。ここで、遅延線型単一光子検出器(注5)と分光器を組み合わせることで、両光子の到着時刻と周波数を同時に計測します。

自発的パラメトリック下方変換で生成される量子もつれ光子対は、時間と周波数に関して強い量子相関をもっています。このため、検出したアイドラー光子の時間・周波数情報を手がかりに、サンプルを励起したシグナル光子の時間・周波数情報を再構成できます。その結果、従来の古典光による二次元分光法で必要だったような、複数の超短レーザーパルスの精密な遅延制御を行わなくても、二次元スペクトル情報を取得できる可能性が開かれます。これは、多次元分光装置の大幅な簡素化・小型化につながりうる点で重要です。さらに本提案は、信号検出が蛍光に基づくことから、従来の四光波混合による二次元分光計測で問題となりがちな、複数の非線形光学過程からの寄与が混在する状況に対して、誘導放出に相当する成分を選択的に引き出せます。これにより、図2に示すようにスペクトルのピーク形状が簡素化され、観測スペクトルから分子ダイナミクスに関する情報をより明瞭に抽出できることが期待されます。

これらの利点は、研究チームがこれまで「量子もつれ光子対の両方を分子に照射する」タイプの時間分解量子分光において理論的に示してきたものでもあります。しかしその方式は、信号の弱さのため実験実装が困難という課題がありました。本研究では、蛍光光子とアイドラー光子の同時計数検出により、量子もつれ光子対に由来する事象のみを選択的に抽出して非相関光子由来の背景ノイズの影響を抑えつつ、量子相関の利点を時間分解分光へ現実的に組み込む道筋を示しました。この点に本研究の大きな意義があります。

本研究で想定している単一光子検出は、すでに市販されている遅延線型単一光子検出技術に基づいており、実験的に実現可能な「量子もつれ光子対による時間分解分光」への道筋を示すものです。今後は、本手法の実験実装に向けた技術開発を推進し、提案した分光計測手法を用いて、生体分子内部における化学反応過程の物理機構など、未解明な物理化学現象の解明を目指します。

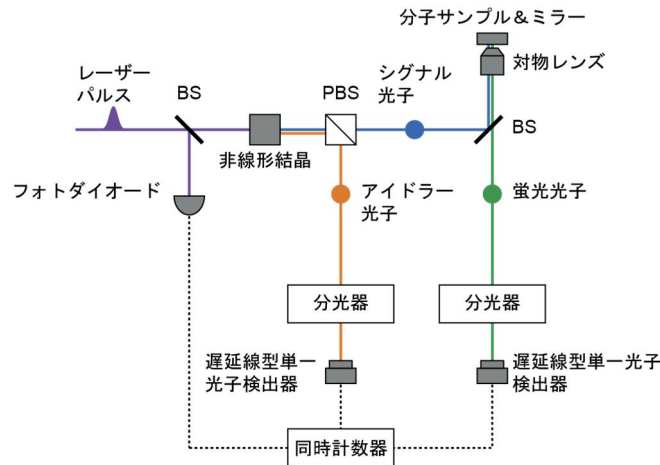


図 1：量子もつれ光子対による二次元蛍光分光の光学系の概略図

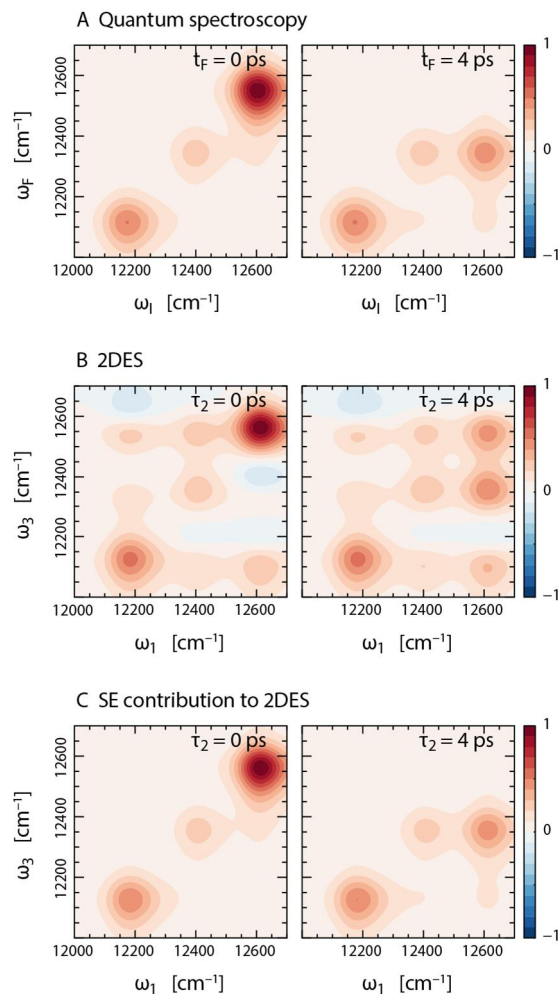


図 2：光合成捕獲タンパク質における二次元スペクトルのシミュレーション結果

(A) 本提案の量子もつれ光子対を用いた二次元スペクトル。(B) 従来の古典光（四光波混合）による二次元スペクトル。誘導放出成分に加えて、基底状態ブリーチングや励起状態吸収など複数の非線形光学過程の寄与が重なって現れるため、スペクトルが複雑化し、解釈が難しくなることがあります。(C) 図 B に含まれる誘導放出成分のみを抽出して表示した結果。

発表者・研究者等情報

東京大学

大学院理学系研究科 化学専攻

石崎 章仁 教授

藤橋 裕太 特任助教

電気通信大学

大学院情報理工学研究科 基盤理工学専攻

清水 亮介 教授

磯 大空 研究当時：博士前期課程 2 年

現：英国グラスゴー大学 博士課程 1 年

論文情報

雑誌名：Science Advances

題名：Two-dimensional fluorescence spectroscopy with entangled photons and time-and frequency-resolved two-photon coincidence detection

著者名：Yuta Fujihashi, Ozora Iso, Ryosuke Shimizu, Akihito Ishizaki

DOI：10.1126/sciadv.aed7026

注意事項（解禁情報）

日本時間 4 月 18 日午前 3 時（米国東部夏時間：17 日 14 時）以前の公表は禁じられています。

研究助成

本研究は、文部科学省「光・量子飛躍フラッグシッププログラム（課題番号：JPMXS0118069242）」、日本学術振興会 科研費「基盤研究（B）（課題番号：JP21H01052）」、「基盤研究（C）（課題番号：JP23K03341）」の支援により実施されました。

用語解説

（注 1）量子もつれ

一方の粒子の特性（偏光や周波数など）を測定すると、その結果ともう一方の粒子の特性の測定結果の間に、量子力学に特有の強い相関が現れることがあります。このように、二つの粒子を個別に独立した状態として記述できず、全体として一つの量子状態を共有しているとき、二つの粒子は量子もつれ状態にあるといえます。これらの相関は、粒子同士がどれだけ離れていても観測され得ます。

（注 2）量子もつれ光子対

量子もつれ状態にある2個の光子の組です。典型的には、自発的パラメトリック下方変換により生成され、時間・周波数などに強い相関をもつように設計できます。本研究では、この相関を「時刻の基準」や「周波数の参照」として用いることで、複数のレーザーパルスを必要とせず二次元スペクトルの取得を可能にします。

(注3) 二次元分光法

分子系の励起状態ダイナミクスを、二つの周波数軸をもつスペクトルとして可視化する時間分解分光法の一つです。色素間の励起エネルギー移動や電子状態間の相互作用など、一次元スペクトルでは区別しにくい現象を、非対角ピークとして直接観測できる点に特徴があります。通常は複数の超短パルスの遅延時間を精密に制御して測定します。

(注4) 自発的パラメトリック下方変換

非線形結晶にレーザー光を入射したときに、1個の高エネルギー光子が自発的に2個の低エネルギー光子へ変換される過程です。生成される2光子はエネルギー保存則などにより量子力学的相関をもち、条件によっては時間・周波数自由度について強い相関をもつようになります。

(注5) 遅延線型単一光子検出器

入射した単一光子を高感度に検出し、検出位置と到着時刻を高い精度で記録できる検出器です。遅延線構造を用いて信号の到達時間差から位置情報を読み出します。本研究では分光器と組み合わせ、光子の周波数と到着時刻を同時に計測する用途を想定しています。

問合せ先

<研究内容について>

東京大学大学院理学系研究科

教授 石崎 章仁 (いしざき あきひと)

Tel : 03-5841-4990 E-mail : ishizaki@chem.s.u-tokyo.ac.jp

電気通信大学大学院情報理工学研究科

教授 清水 亮介 (しみず りょうすけ)

Tel : 042-443-5920 E-mail : r-simizu@uec.ac.jp

<機関窓口>

東京大学大学院理学系研究科 広報室

Tel : 03-5841-8856 E-mail : kouhou.s@gs.mail.u-tokyo.ac.jp

電気通信大学総務部総務企画課広報係

Tel : 042-443-5019 Fax : 042-443-5887

E-Mail : kouhou-k@office.uec.ac.jp