

量子もつれ光を用いた、新たな赤外分光法を実証

—分析装置の飛躍的な小型化・高性能化に期待—

概要

電子や光子などの量子は、通常の物体とは異なった振るまいをします。その量子の個々の振るまいや相関(量子もつれ)を制御することで、飛躍的な計算能力を実現する量子コンピューターや、盗聴不可能な暗号を実現する量子暗号、さらに、従来の計測技術の限界を超える量子センシングなど、「量子技術」の研究が精力的に進められています。

今回、京都大学大学院工学研究科 竹内繁樹 教授、岡本亮 同准教授、向井佑 同研究員、田嶋俊之 同研究員、荒畑雅也 同博士課程学生らの研究グループは、量子もつれ光の干渉を用い、可視光のみの検出で赤外分光を実現する「フーリエ変換型赤外量子分光法」を提案・実証しました。本方法を用いることで、スマートフォンなどで用いられているシリコン光検出器によって、赤外吸収スペクトルや、屈折率スペクトルが取得できるようになります。分析装置の飛躍的な小型化や高感度化が可能となり、量子センシングの社会実装のさきがけとなることが期待されます。

本成果は、2021年3月8日に米国の国際学術誌「Physical Review Applied」にオンライン掲載されました。

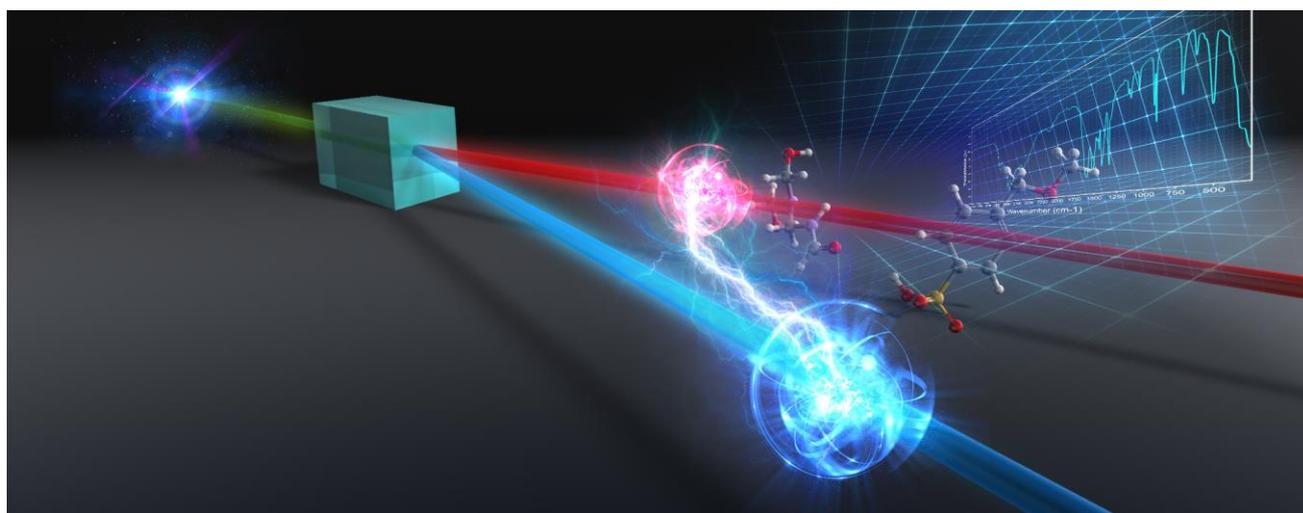


図1 今回実証したフーリエ変換型赤外量子分光法のイメージ図

1. 背景

電子や光子などの量子は、通常の物体とは異なった振るまいをします。その量子の個々の振るまいや相関(量子もつれ)を制御することで、飛躍的な計算能力を実現する量子コンピューターや、盗聴不可能な暗号を実現する量子暗号、さらに、従来の計測技術の限界を超える量子センシングなど、「量子技術」の研究が精力的に進められています。その中でも、光子は、長距離伝送が可能で、また室温でも量子状態が保存されるため、有力な担体です。特に、光のさまざまな波長(色)の対となった「量子もつれ」光源の活用が注目されています。

最近、その量子もつれ光を利用した、「赤外量子吸収分光法」が注目を集め、精力的な研究が進められています。赤外分光法は、物質中の分子の種類を特定する方法として、化学・生命科学・医療から環境モニタリングや工業生産など、幅広い分野で利用されています。ただし、従来の装置では、赤外域での検出器や光源の感度や効率などが、装置の小型化の重大な支障となっていました。赤外量子吸収分光法は、可視域と赤外域に発生する「量子もつれ光子対」を利用することで、一般に用いられているシリコン光検出器と可視域の光源のみを用いて赤外吸収スペクトルを取得することが可能となり、装置の飛躍的な小型化や高感度化が期待されます。しかし、従来の赤外量子吸収分光法では、可視域の光子を波長ごとに分解するための「分光装置」を設ける必要があり、小型化の実現や高分解能の実現に対し重大な問題となっていました。

2. 研究手法・成果

今回、分光装置を用いない、新たな赤外量子分光法である、「フーリエ変換型赤外量子分光法」(Quantum Fourier-transform infrared spectroscopy: QFTIR)を提案・実証しました。実験装置の概要を図2に示します。可視域のレーザー光を非線形光学結晶に入射すると、可視光子と赤外光子の対であるもつれ光子対が発生します(A)。この光子対を、波長フィルターで分離し、赤外光子を鏡で反射させます。また、可視光子とレーザー光も、別の鏡で反射し、非線形光学結晶に再度入射すると、(A)の時と同様に光子対が生成されます(B)。この(A)と(B)の二つの発生事象は、その出力からは区別することが出来ないため、いわゆる量子干渉が生じます。その2つの事象の「位相差」を、赤外光子の反射鏡の位置を掃引し変化させることで、発生する可視の光子は増減し、干渉縞を生じます(図3)。今回、この干渉縞を「フーリエ変換」することにより、赤外光子の経路に設置された媒質の、赤外吸収スペクトルや、さらに通常のフーリエ変換型赤外分光法(FTIR)での測定が困難な屈折率スペクトルを取得できることを理論的に示しました。さらに、検証用の実験系を構築し、光学特性が既知である光学フィルターの透過率絶対値スペクトル(図4)や、石英ガラスの屈折率(物質中での光の速度の指標)と消衰係数(光の吸収量の指標)のスペクトル(図5)の計測に成功しました。

3. 波及効果、今後の予定

本方法を用いることで、スマートフォンなどで用いられているシリコン光検出器によって、赤外吸収スペクトルや屈折率スペクトルが取得できるようになります。これによって、装置の飛躍的な小型化や高感度化が可能となり、量子センシングの社会実装のさきがけとなることが期待されます。また、コンパクトで高性能な赤外分光装置の実現により、環境モニタリングや、医療・セキュリティなど様々な分野への波及効果が期待されます。

今後は、本技術の実用化を目指し、より長波長域での赤外量子分光測定の実証や、装置の小型化などの研究を推進します。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、主として文部科学省光・量子飛躍フラッグシッププログラム（Q-LEAP「量子もつれ光子対を利用した量子計測デバイスの研究」）（代表者：竹内繁樹 京都大学教授、JPMXS0118067634）の他、一部科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業、科学研究費等の支援を受け実施いたしました。

<用語解説>

赤外量子吸収分光法：Infrared Quantum Absorption Spectroscopy (IRQAS). 重ね合わせやもつれ合いといった量子力学特有の性質を利用して、古典的計測技術の限界を越える量子センシング技術の一つ。時間・空間的に隔てられた光子対生成過程間の干渉現象を利用することで、量子もつれ光子対（下記項目参照）を形成する光子の一方(測定用光子)に対して生じる光吸収、位相遅延などの情報を、相関を持つもう一方の光子（検出用光子）の発生数変化として読み取ることが可能になります。測定用光子、検出用光子がそれぞれ赤外・可視領域の波長をもつように光子対を発生させることで、可視の光計測を通した赤外分光を行うことができます。

量子もつれ光子対：量子もつれ (Quantum Entanglement) とは、2つの異なるシステム間で相関した状態が2つ以上あり、それらが（量子において複数の状態が同時に成立する）量子重ね合わせ状態にあることを言います。IRQAS においては2つの光子のエネルギー(あるいは周波数)の総和が常に一定となる様な、「周波数もつれ」をもつ光子対が利用されます。

フーリエ解析(変換)：フーリエ解析とは、対象とする信号（例えば時間経過とともに変動していく電気信号など）に特定の変換操作を加え、元の信号に含まれる周期的な信号成分を抽出する解析手法です。この手法は光学測定においても広く利用されており、光電場の時間波形に相当する信号にフーリエ変換を施すことで、周波数領域のパワースペクトル（光強度）を評価することができます。今回実証した QFTIR においては量子干渉信号に対してフーリエ変換を行うことで赤外光スペクトルが算出できます。

<研究者のコメント>

量子もつれ状態は、シュレーディンガーの提唱からまもなく 100 年を迎えます。今後も、量子もつれをはじめとする量子の不思議な性質を利用した、従来の限界を超える技術の研究を、学生、スタッフと共に推進します。

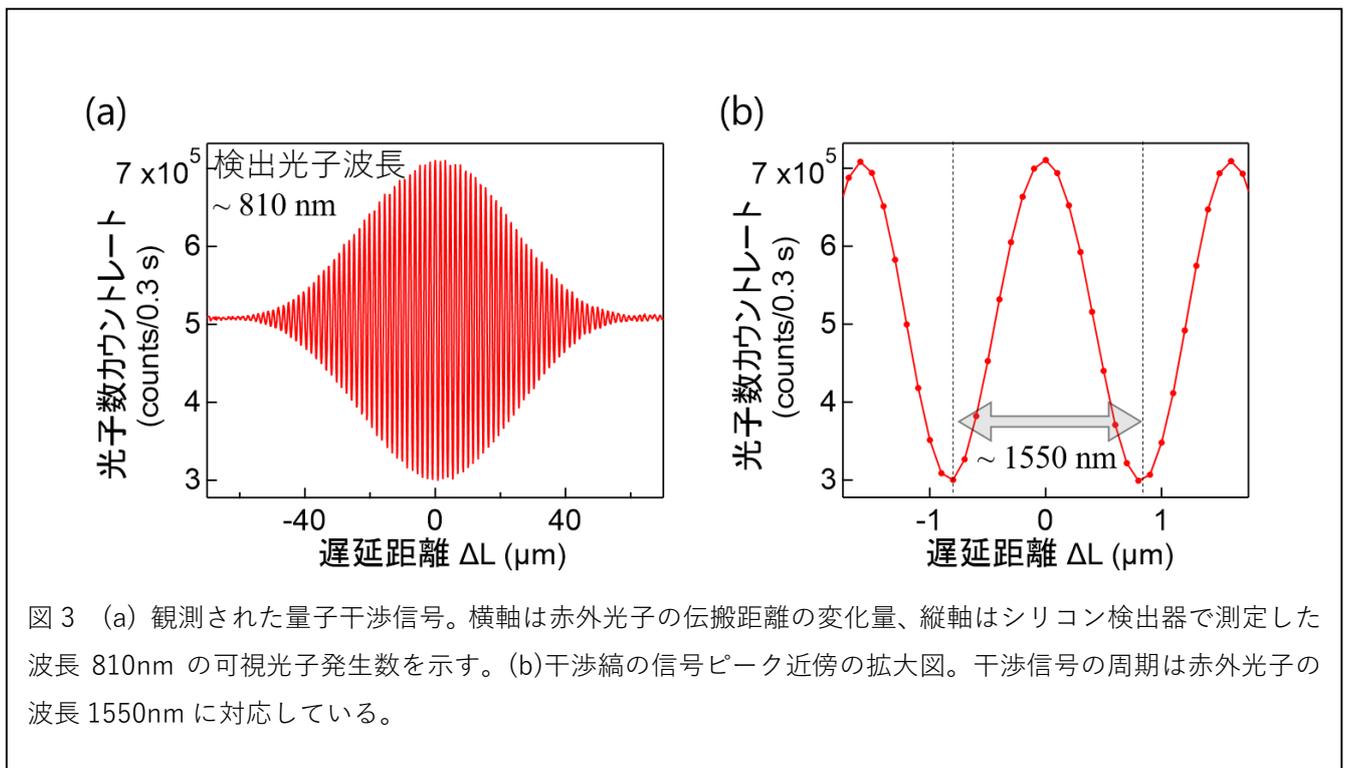
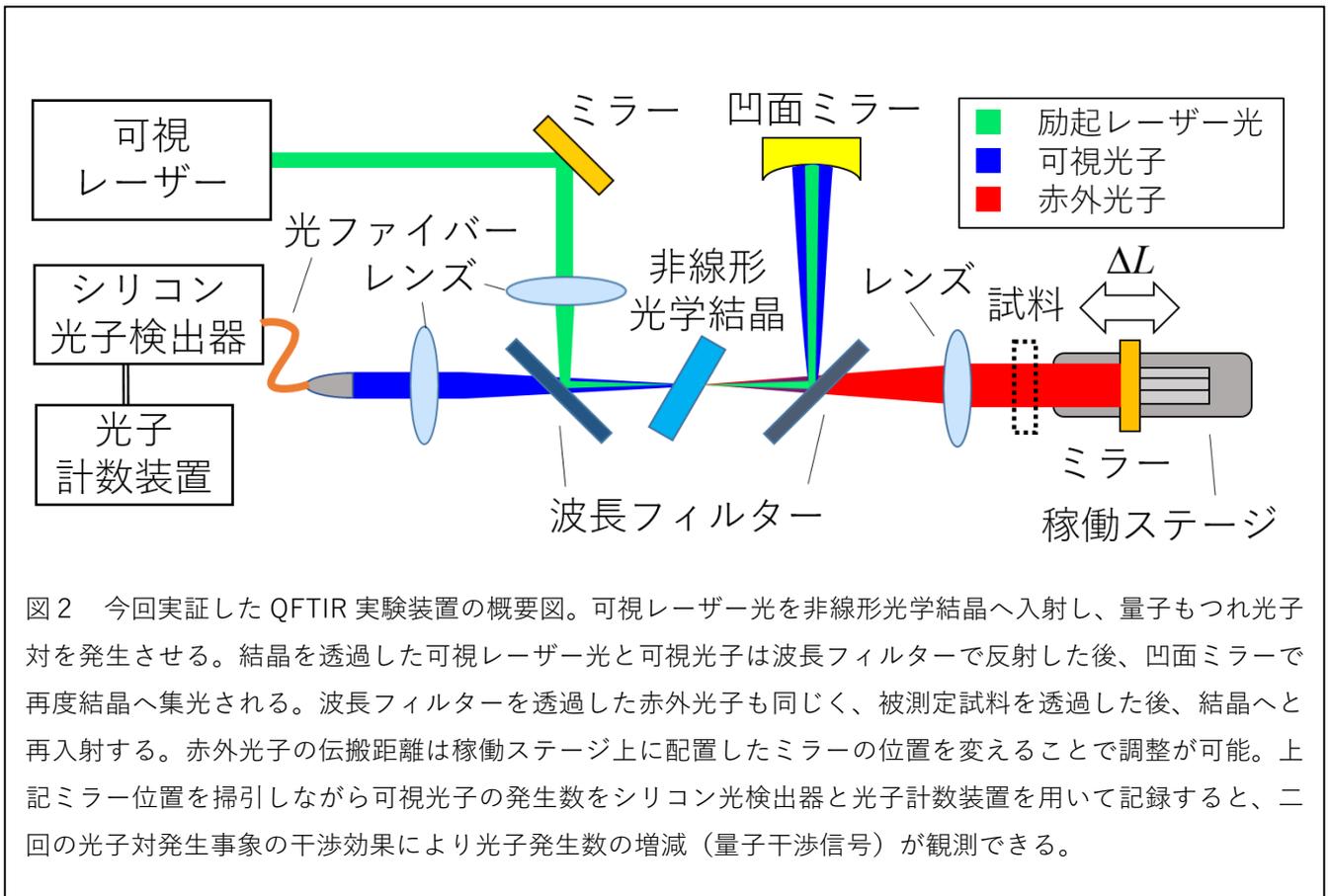
<論文タイトルと著者>

タイトル：Quantum Fourier-Transform Infrared Spectroscopy for Complex Transmittance Measurements
(複素透過率測定にむけたフーリエ変換型赤外量子分光法)

著者：向井佑（京大）、荒畑雅也（京大）、田嶋俊之（京大）、岡本亮（京大）、竹内繁樹（京大）

掲載誌：Physical Review Applied DOI：https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.15.034019

< 参考図表 >



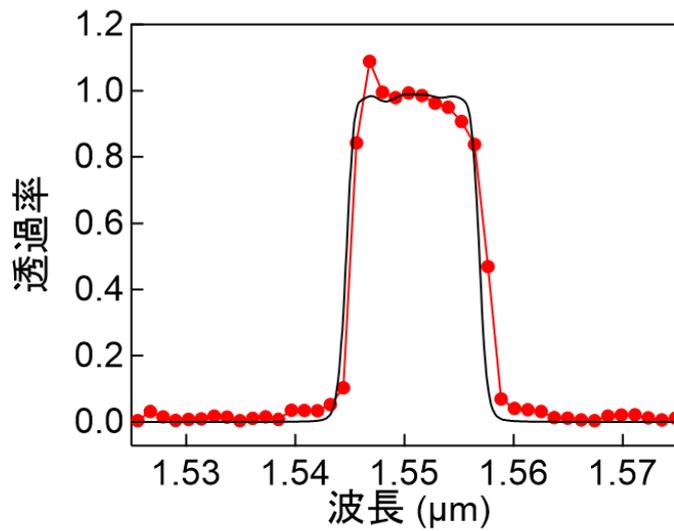


図4 今回実証した QFTIR により測定した光学フィルターの透過率スペクトル (赤線)。黒線は従来の分散型分光器によって測定した透過率スペクトルであり、QFTIR の測定結果と定量的な一致を示している。

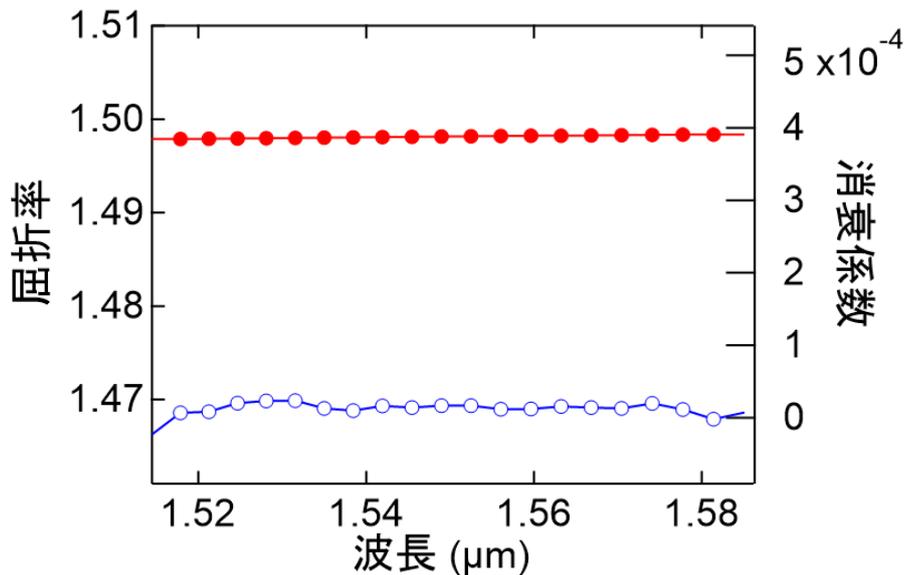


図5 今回実証した QFTIR の計測結果を用いて算出した石英ガラスの光学特性スペクトル。屈折率 (赤丸) は媒質中の光の速度に対する真空中の光速度の比、消衰係数 (青丸) は光吸収の程度をあらわす。今回の測定により求められた屈折率 (~1.5) は近赤外波長領域における石英ガラスの典型値と合致している。非常に小さな消衰係数 ($<<10^{-4}$) はこの波長域において測定試料が透明であることを示している。