



光子のふしぎな性質と量子技術への応用

京都大学 大学院工学研究科 電子工学専攻 応用量子物性分野
竹内繁樹教授、岡本亮准教授、衛藤雄二郎准教授、高島秀聡助教

光は波？粒？（300年ほど前）

光は粒子である
“粒子説”vs.“波動説”
光は波である

ニュートン (1642-1727) ホイヘンス (1629-1695)

粒の場合 波の場合

光はやっぱり波前（150年前）

- 「光は波の性質である干渉を起こす」ヤングの干渉実験（ヤング、1805年）
- 「光は電気と磁気（じき）でできた波」マクスウェル方程式（マクスウェル、1864年）

光は本当に「波」？

光は、「波の性質をもった粒」（光子）の集まり（アインシュタイン、1905年）

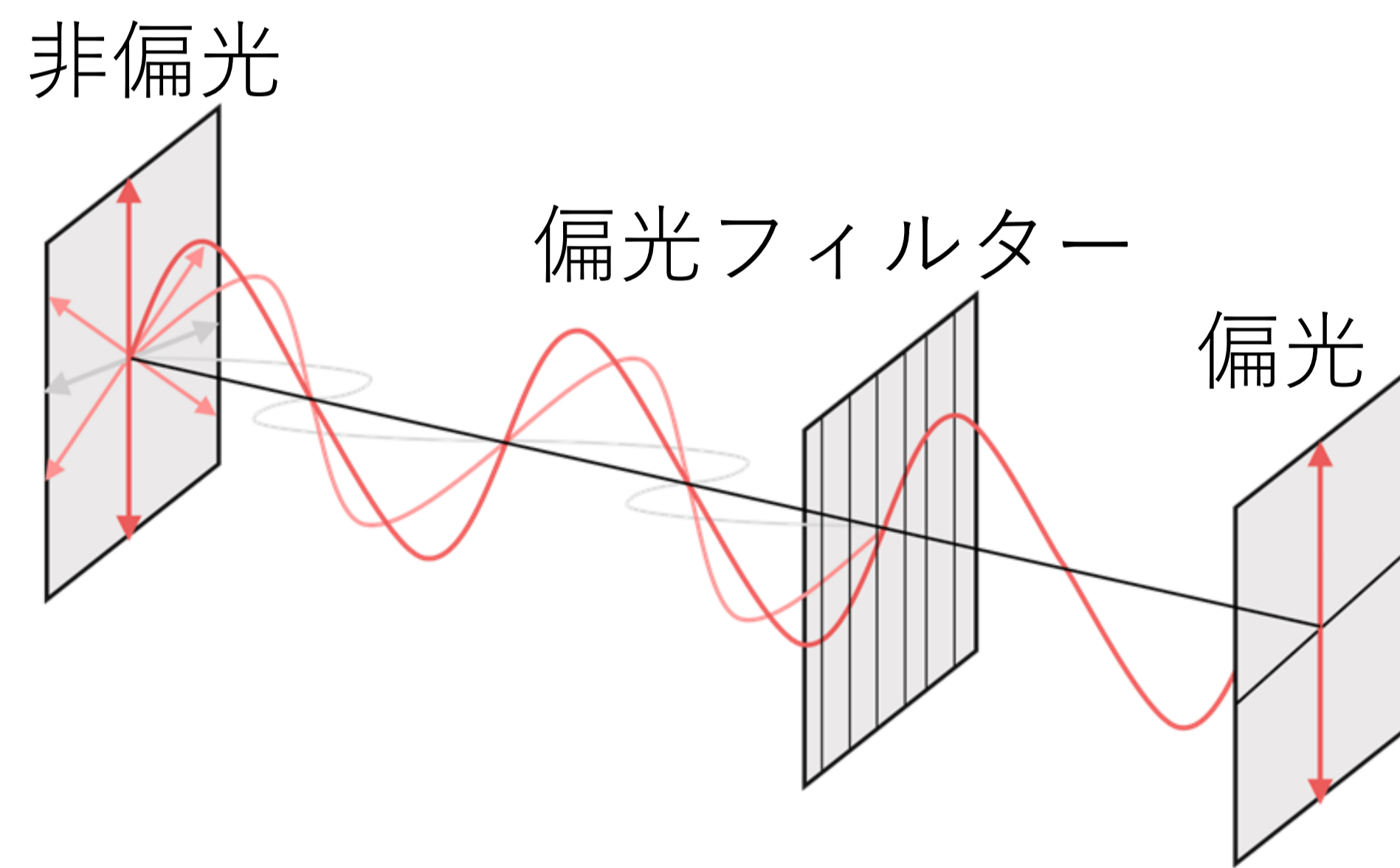
光は“波”と“粒子”の双方の性質をあわせもつ

ニュートンとホイヘンス

モノとモノは引きつけ合う（万有引力）ことを発見。月や惑星の動きも説明！

「光についての論考」（1690年刊行（「光学」の14年前））振り子時計の作製や土星のわかきが傾いていることを発見！

偏光フィルターの性質



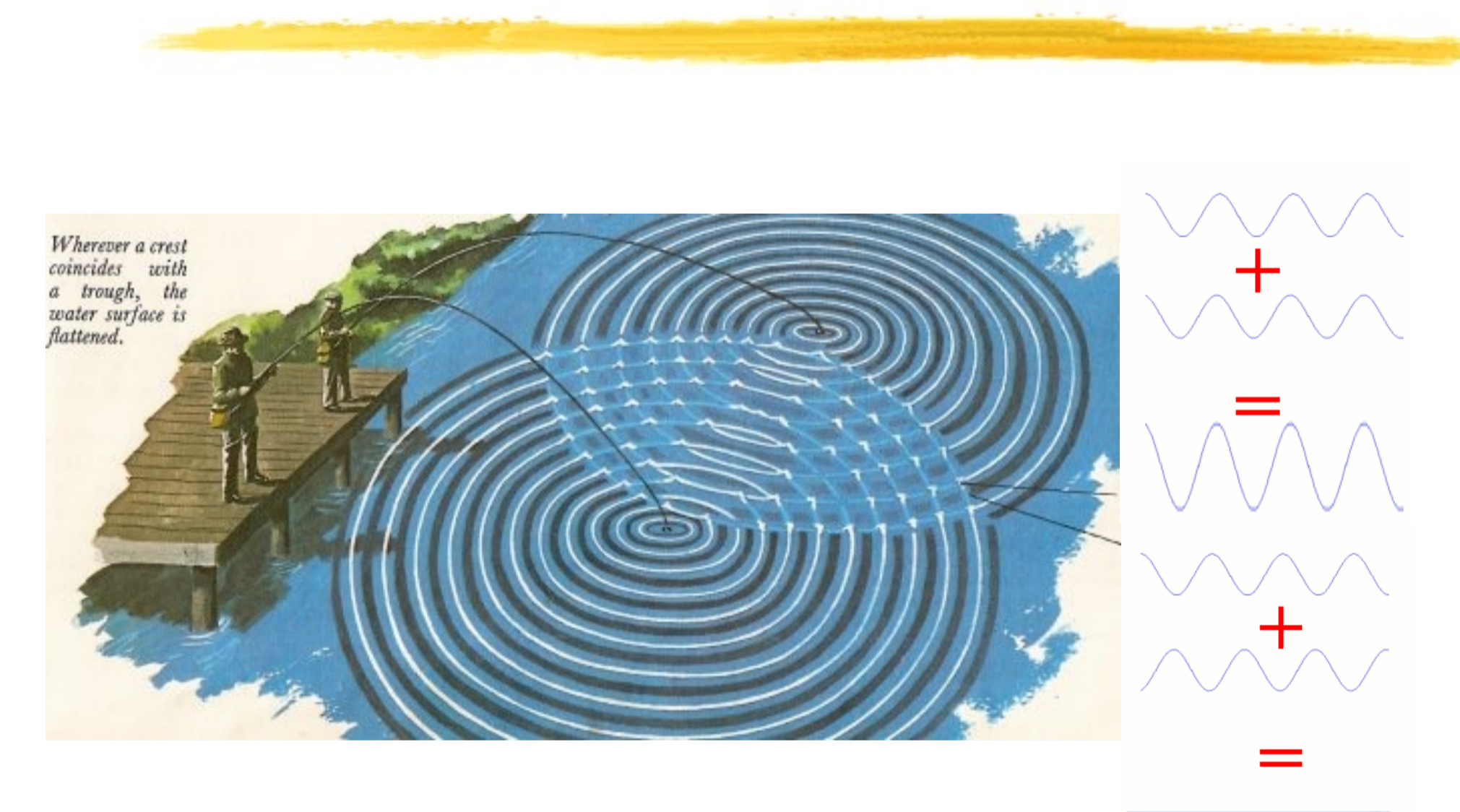
光電効果

光を金属に当てると電子が飛び出す現象

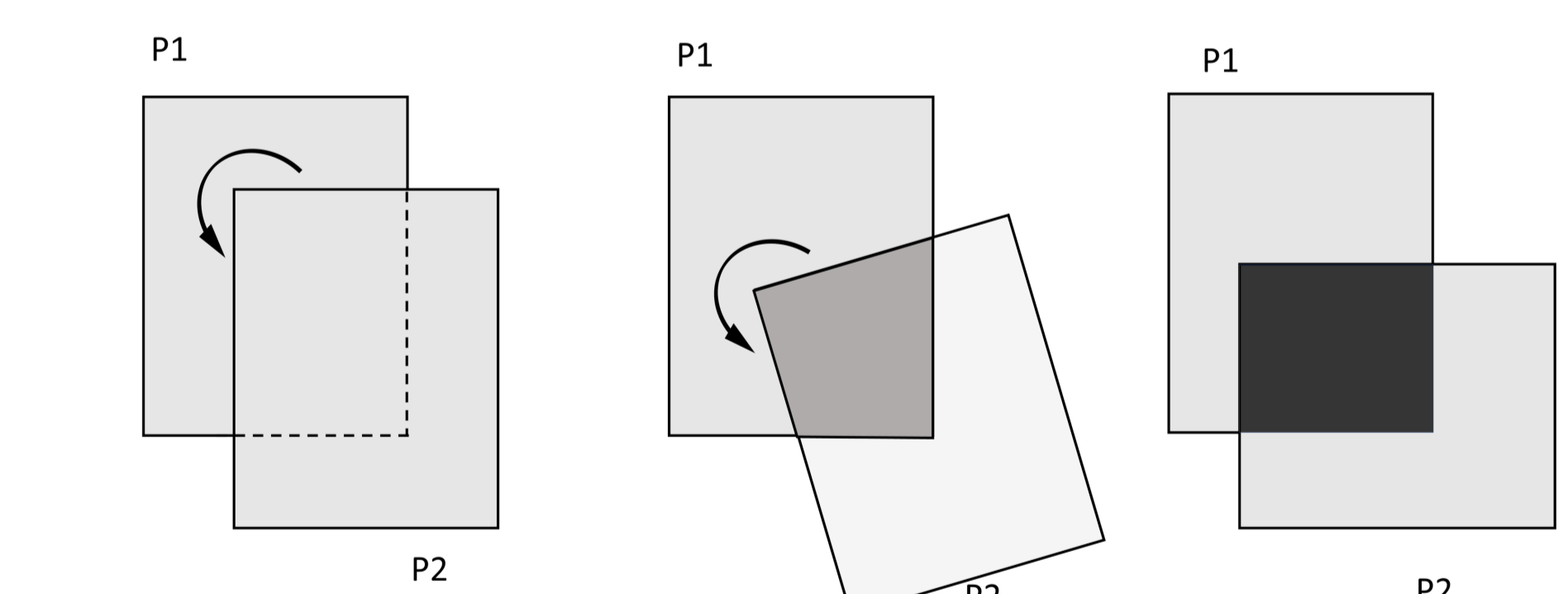
- ① 明るくする → 電子の個数が増えただけ
- ② 色を変える → 電子のエネルギーが変化する振動数
- ③ ある振動数以下だと... → 電子は飛び出ない

光が波だとすると説明できない

波の干渉



2つの偏光フィルターを通過する光



光量子仮説

「光はプランク定数 h と振動数 ν をかけたエネルギーを持つ粒子」

① 光子数 増 ② $\nu_1 < \nu_2$ ③ $h\nu < W$

振動数 増 (例: 赤 → 青)

光子数 増 電子数 増 エネルギー 増

金属が電子を引き止めている力を振り払うことが必要

光の干渉実験

光は「波」！

トーマス・ヤング (1773-1829)

ヤングの2重スリット実験

光は波であることが決定づけられた！

日常生活における偏光の応用

偏光フィルター 偏光フィルター

なし あり

DSLR ゴーグル、サングラス

https://www.switchvision.com/simulator/snow

光子はどうやって観測できる？

光子検出器を使えば、光子ひと粒ひと粒をとることができる

光子が検出器に入ると、電気信号が出力される

光子検出器

単一光子検出器 超伝導単一光子検出器

竹内研究室の研究紹介

私たちは、光子のふしぎな性質を追求し、全く新しい科学・技術の芽を育てます。

光量子情報

光子の個々の振る舞いや相関（量子もつれ）を制御し、量子コンピューターや量子シミュレーターなどの実現をめざす研究です。私たちは、光子と光子の間の「量子干渉」を駆使したさまざまな光量子回路を開発（図1）、この研究を世界的にリードして来ました。

また、私たちは、量子もつれを発生する光源の小型化・集積化にも取り組んでいます。図2は、半導体チップからなる量子もつれ光源です。これは集積化が可能なことから、将来的にはスマートフォンへの実装などさまざまな応用機器の小型化に貢献すると期待されます。

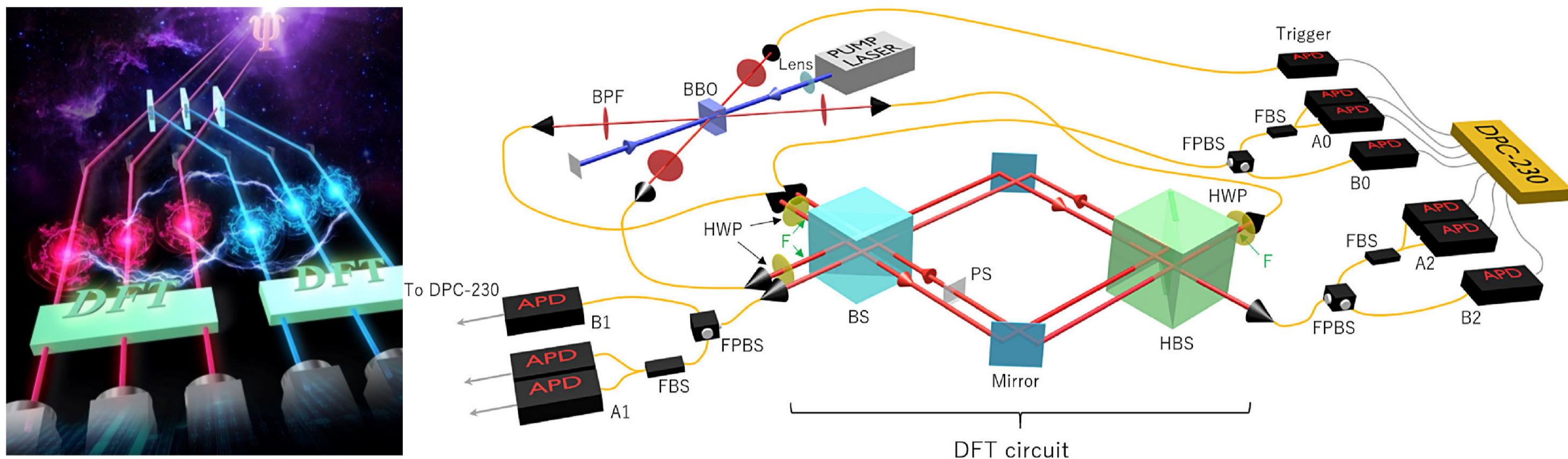


図1 量子フーリエ変換回路

T. Kiyohara, N. Yamashiro, R. Okamoto, H. Araki, Jun-Yi Wu, H. F. Hofmann, and S. Takeuchi, Optica, 7, 1517-1523 (2020)

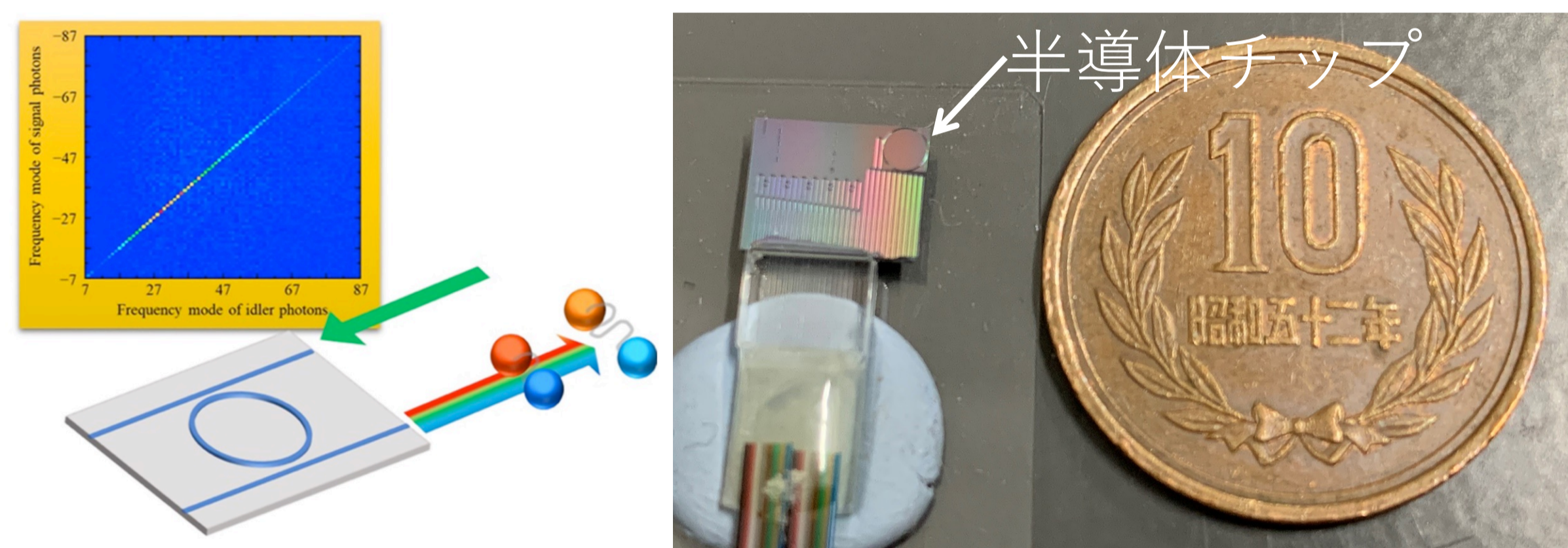


図2 集積化が可能な半導体量子もつれ光子源

K. Sugiura, Z. Yin, R. Okamoto, L. Zhang, L. Kang, J. Chen, P. Wu, S. T. Chu, B. E. Little, and S. Takeuchi, Applied Physics Letters, 116, 224001 (2020).

光子源・量子メモリ

私たちは、ナノテクノロジーを駆使した光デバイス（ナノフォトニクスデバイス）により、ダイヤモンドや半導体量子ドットなどの単一発光体（人工原子）から光子を自在に出し入れし、単一光子を発生させる光子源や量子メモリなどの実現をめざしています。

これまでに、私たちは、単一発光体として、ひとつのシリコン原子が二つの欠陥に囲まれた構造（シリコン欠陥中心）を内包する粒径5nm（原子約30個）の極微ダイヤモンドを開発しました（図3）。また、ナノフォトニクスデバイスとして、光ファイバの一部を直径 300nm（蜘蛛の糸の10分の1程度）の細さまで引き延ばし、光共振器を組み込んだ、ナノ光ファイバブラッグ共振器の開発を行っています（図4）。

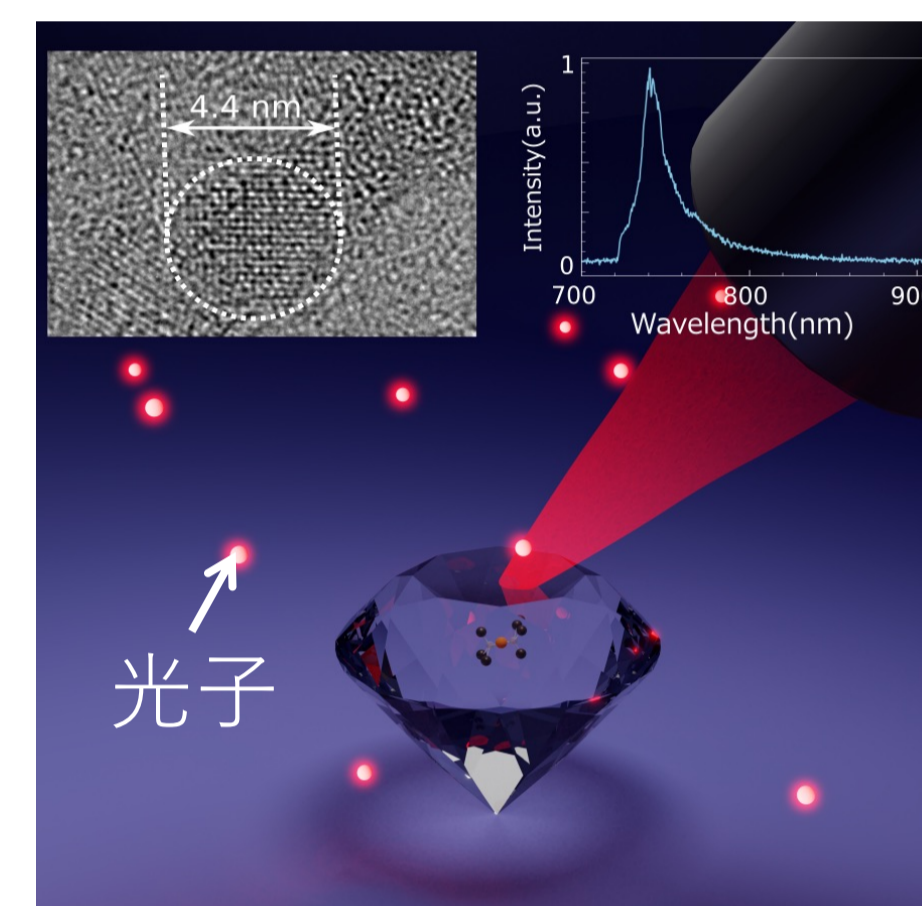


図3 シリコン欠陥中心内包極微ナノダイヤモンド

K. Shimazaki, H. Kawaguchi, H. Takashima, T. F. Segawa, F. T.-K. So, D. Terada, S. Onoda, T. Ohshima, M. Shirakawa, S. Takeuchi, Phys. Status Solidi A, 218: 2100144 (2021)

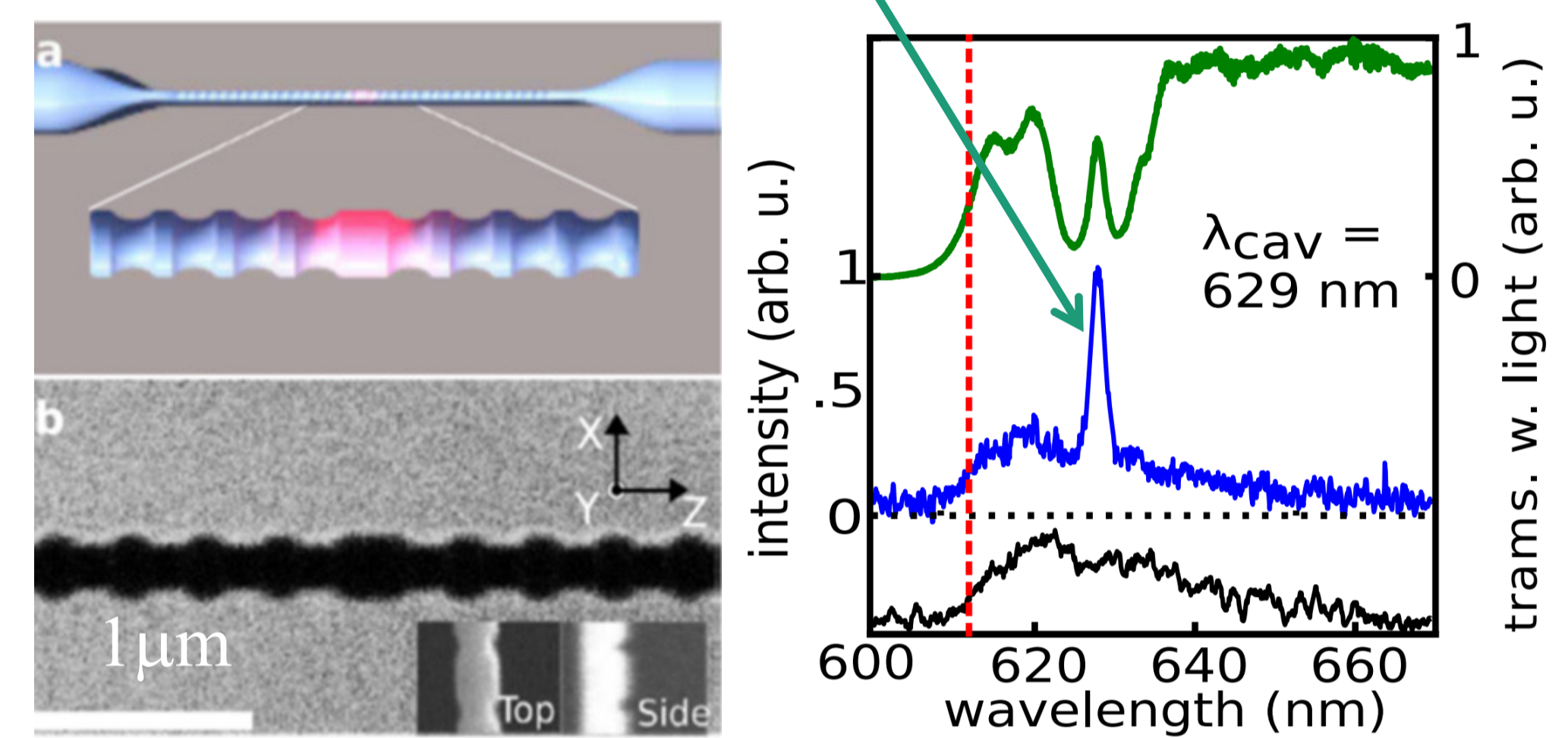


図4 ナノ光ファイバブラッグ共振器

A. W. Schell, H. Takashima, S. Kamioka, Y. Oe, M. Fujiwara, O. Benson, and S. Takeuchi, Scientific Reports, 5, 9619 (2015).

量子赤外分光

「量子赤外分光法」は光の量子的性質を利用し、従来の分光手法の技術的限界を突破する新たな量子計測技術です。赤外波長域には物質ごとに特有の光吸収が存在するため、赤外分光技術は材料、医薬などの開発研究、環境センシングやセキュリティのツールとして幅広い分野で利用されています。しかしながら、従来の赤外分光手法では測定装置の小型化、高性能化を図る際に赤外波長域の光源や光検出器に付随する技術的課題が生じます。

量子赤外分光法は可視-赤外量子もつれ光の発生過程間の「量子干渉」を利用し、測定試料の赤外光吸収に関する情報を、量子もつれの関係にある可視光子の発生数として読み出します（図5）。これにより可視域の光源と検出器のみを用いて赤外分光を行うことが可能となります。将来的にはこの光量子技術を利用した小型、高性能な分光装置の社会実装が期待されます。

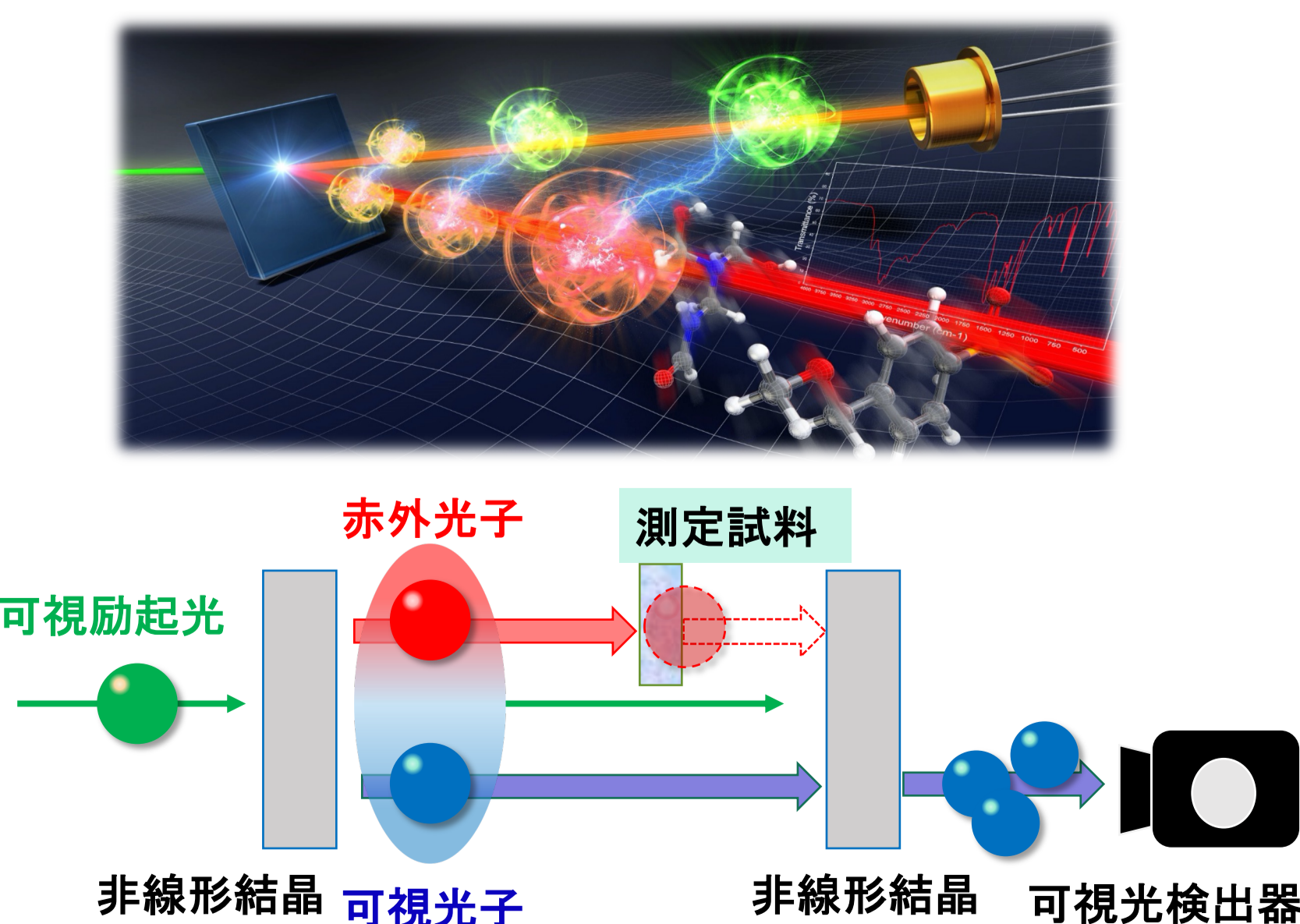


図5 量子赤外分光法

Y. Mukai, R. Okamoto, and S. Takeuchi, Opt. Express 30, 22624-22636 (2022).

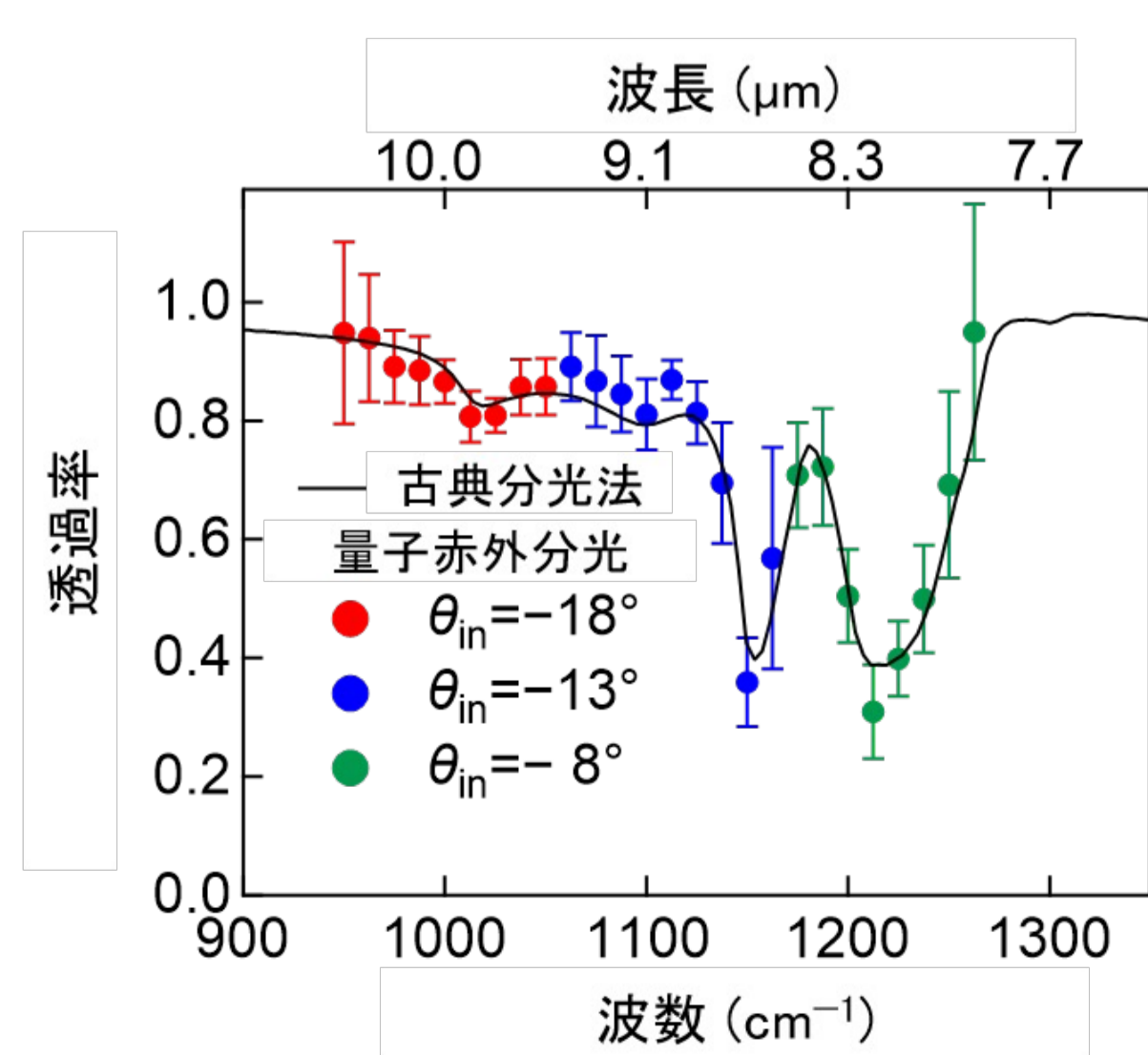


図6 エポキシ樹脂の透過率スペクトル

量子光干渉断層撮影

光干渉断層撮影（OCT）は、そのままの状態の試料の内部観察が可能なことから、現在様々なところで用いられています。しかし、試料の屈折率分散の影響によって、深さ分解能が劣化してしまい、10 μm程度に制限されてしまうことが課題となっています。一方、周波数もつれ光子対による2光子量子干渉を利用した断層撮影である量子OCTは、屈折率分散による深さ分解能の劣化を、自動的に大きく抑制する等の利点があります。私たちは、広帯域に周波数もつれ光子対を発生させるチャープ疑似位相整合素子や、それを導波路化した素子を用いた光源を開発することで、量子OCTの高分解能化や高速化の研究に取り組んでいます。

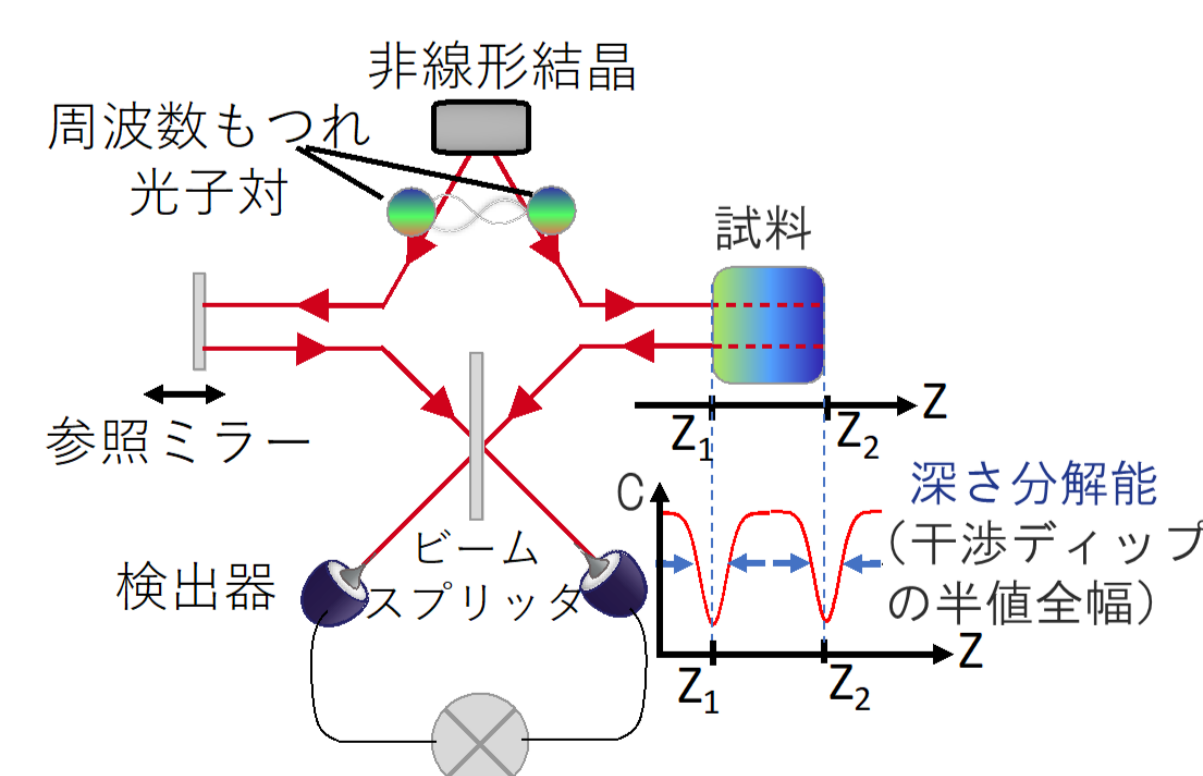


図7 量子OCTの測定系

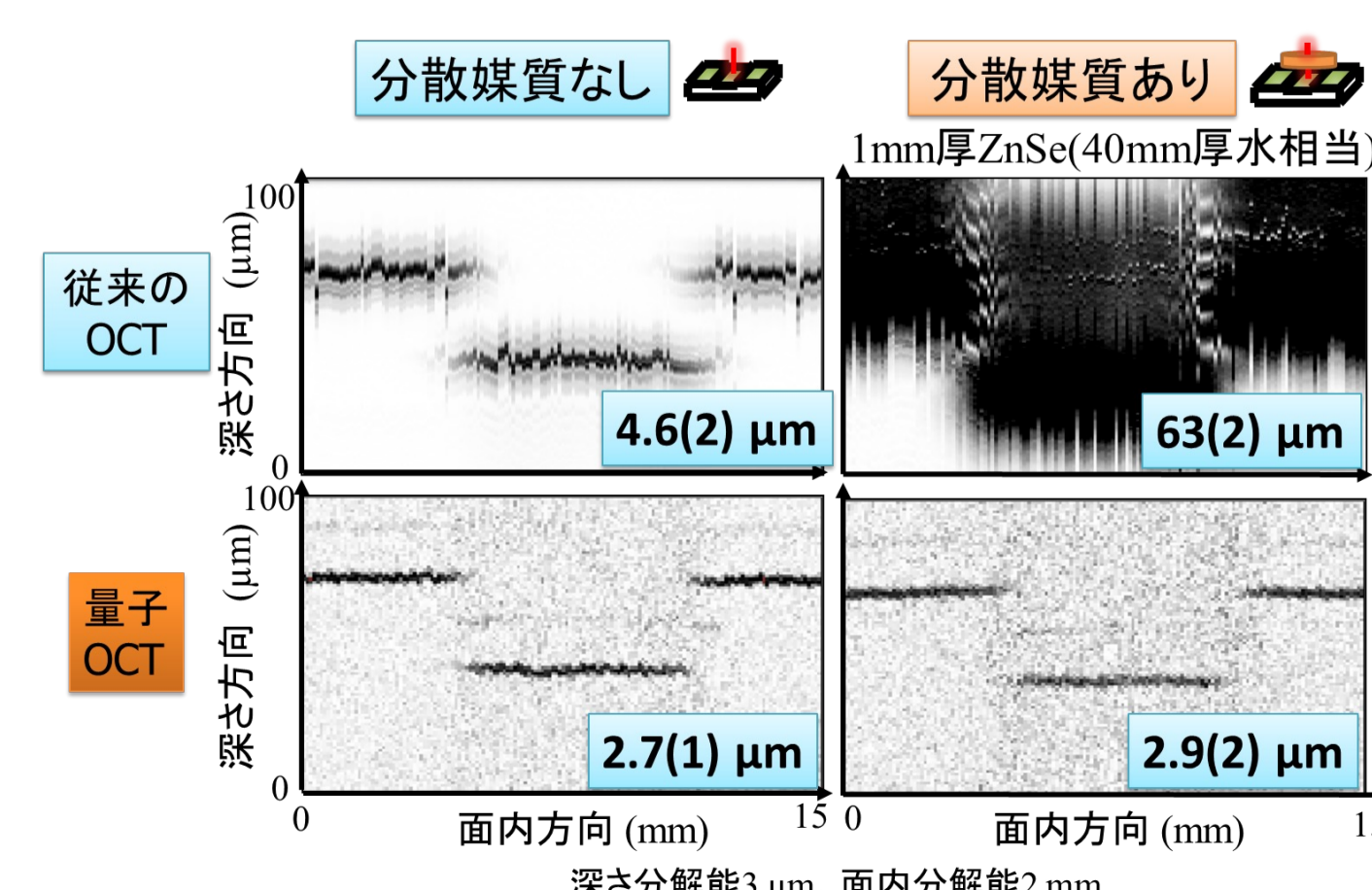


図8 量子OCT像の分散耐性

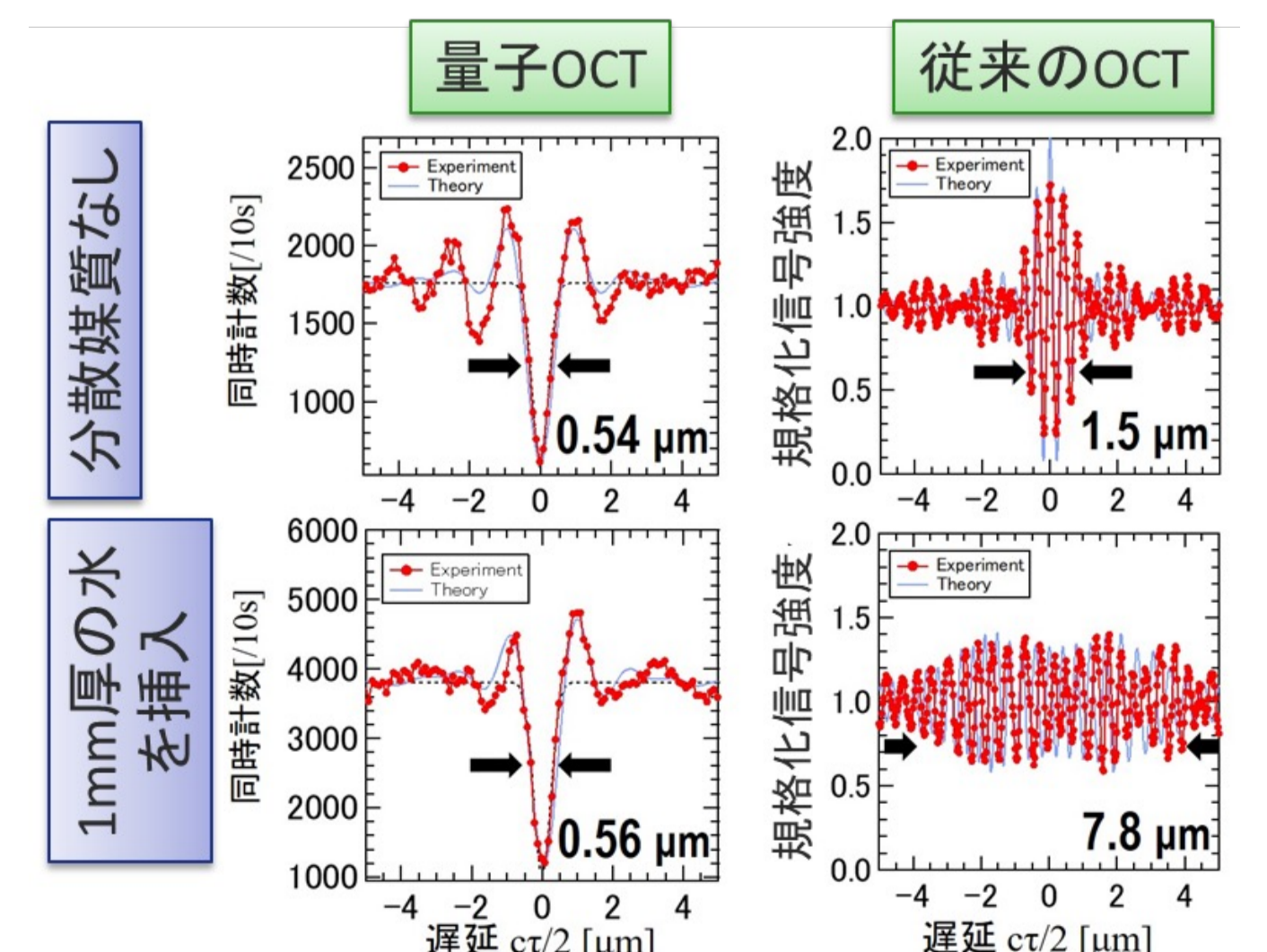


図9 高分解能量子OCTの分散耐性

M. Okano, H. H. Lim, R. Okamoto, N. Nishizawa, S. Kurimura, and S. Takeuchi, Sci. Rep., 5, 18042 (2015).