

量子技術の実験研究がしたい人は早瀬研へ！

*Quantum Opto-Electronics
Hayase Lab, KEIO Univ.*

量子光エレクトロニクス研究室

～教員による研究紹介～

量子2.0～“量子”が最もエキサイティングな時代に！

科学として重要かつ面白い！

古典限界を超える革新的な技術が実現可能に！

“量子もつれ光子を用いたベルの不等式の破れの実験と量子情報科学の先駆的研究”

量子コヒーレンス（重ね合わせ状態）を活用

2022年 ノーベル物理学賞



III. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach
Alain Aspect



III. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach
John F. Clauser



III. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach
Anton Zeilinger

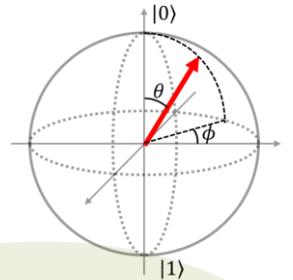
ノーベル財団HP

量子技術
3つの柱

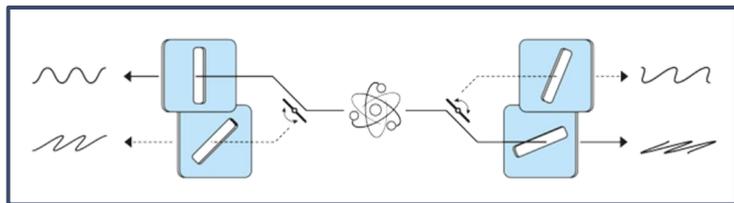
量子
コンピュータ

量子センサ

量子通信



非線形光学
効果を利用

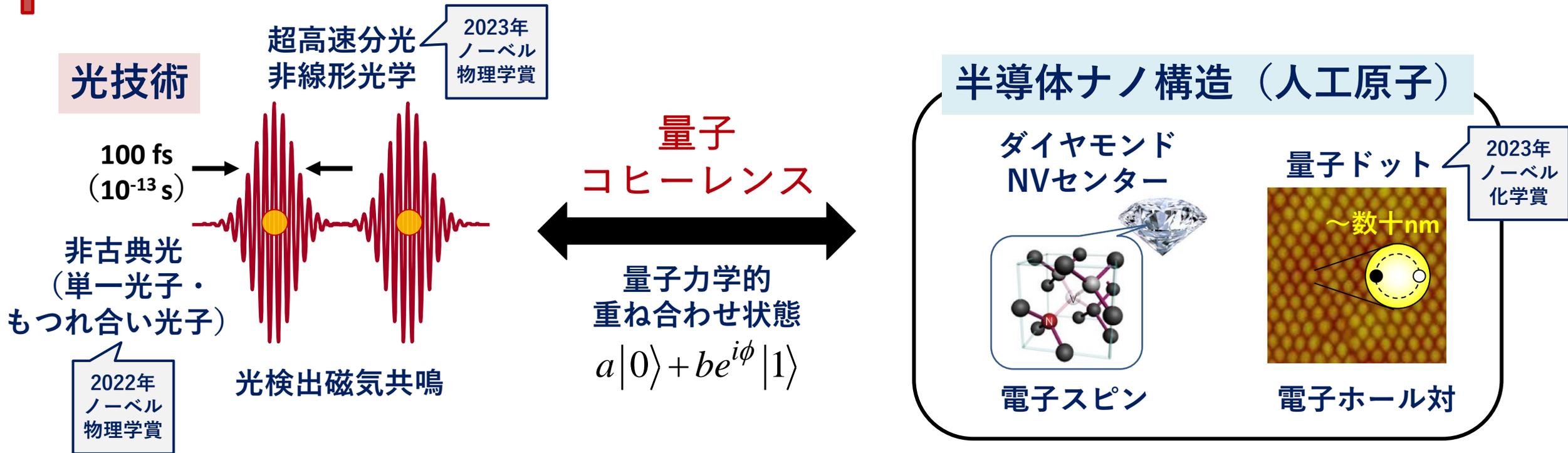


基礎学理
基盤技術

量子力学 量子光学 非線形光学 情報科学
材料・物性 エレクトロニクス
フォトンクス スピントロニクス

✓ 量子状態（量子もつれや量子コヒーレンス）の制御技術が鍵

早瀬研の研究テーマ～量子光エレクトロニクス～



光子と電子の量子状態 (量子コヒーレンス) を制御

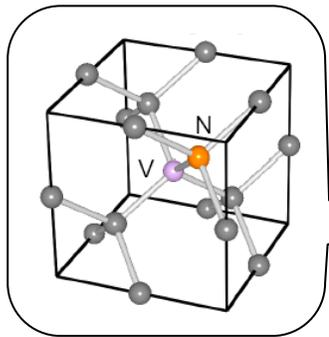
▶ 新しい量子物理の解明と革新的量子技術の開発

- ◆ ダイヤモンドNVセンターを用いた量子センサ
- ◆ 超高速非線形分光と量子ドットを用いた量子フォトンクス

ダイヤモンドNVセンターを用いた量子センサ

電子スピンの量子状態を用いて古典センサでは測れなかったものを測る

ダイヤ量子センサとは？



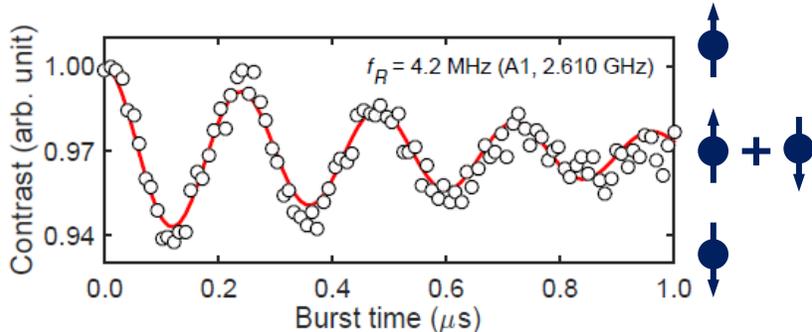
マイクロ波
(状態操作)

レーザー
(状態初期化)

発光
(状態読み出し)

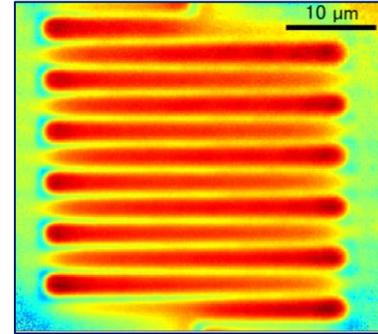
スピン重ね合わせ状態
(量子コヒーレンス)
を制御・測定

・ ミクロな領域の
磁場・電場・温度
を高感度に測定。



磁場・温度イメージング

企業と共同研究



- ・ 回路検査, 電磁場計測, 医療診断など幅広い分野への応用.
- ・ 物性計測などにより基礎物理の発展に寄与.

量子状態制御法の開発. 量子力学の解明・追究.

岡庭君 (M2)



- 🏆 優秀卒論賞 受賞
- 🏆 NICT量子人材育成プログラム 採択 (研究費100万支給)
- 🏆 学振DC1 採択
- 🏆 国際会議 口頭発表3件

大坪君 (M1)



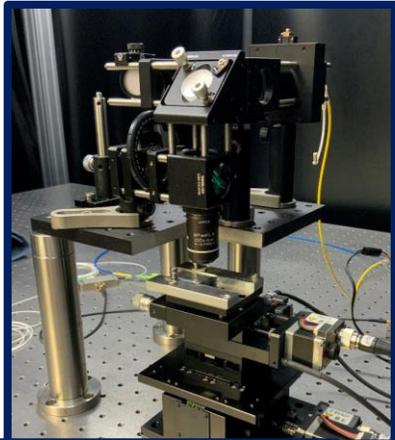
- 🏆 応用物理学会フォトニクス研究会優秀ポスター賞 受賞
- 🏆 国際会議 ポスター発表2件

✓ 量子力学の基礎も応用もどちらも研究できます！

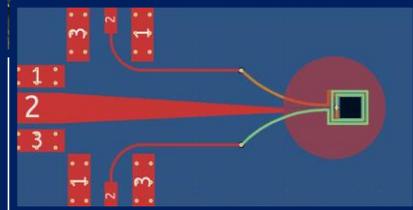
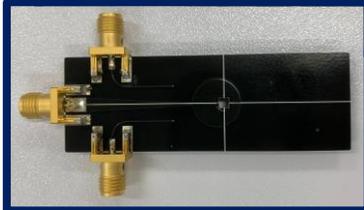
ダイヤモンドNVセンターを用いた量子センサ

電子スピンの量子状態を用いて古典センサでは測れなかったものを測る

装置構築



- 光学系設計
- 高周波回路設計
- アンテナ設計
- プログラミング

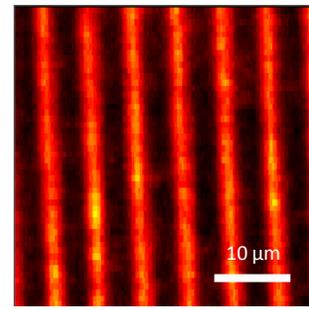
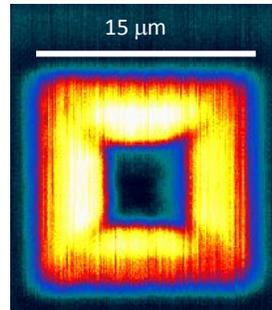


北陸先端科学技術大学院大学（プローブ顕微鏡の専門家）と共同研究

サンプル作製



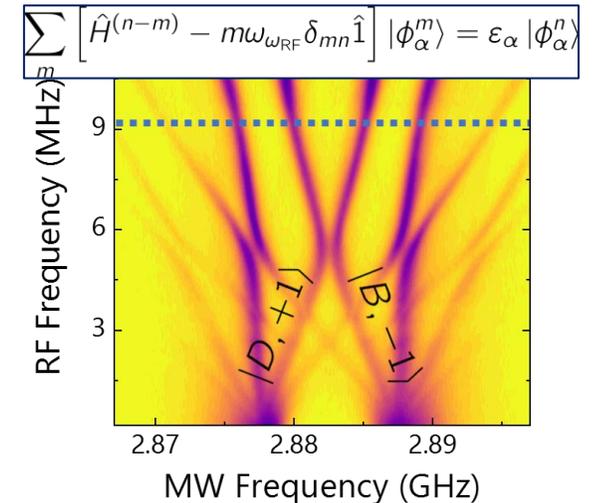
- ダイヤ成長（同位体制御）
- ダイヤ加工（位置・配向制御）
- 物性物理



金沢大，産総研，物材機構（ダイヤモンド成長の第一人者）と共同研究

量子物理・量子力学

- 量子状態制御
- 量子物理・量子力学の解明



中央大・京都大・東京大
・理研との共同研究

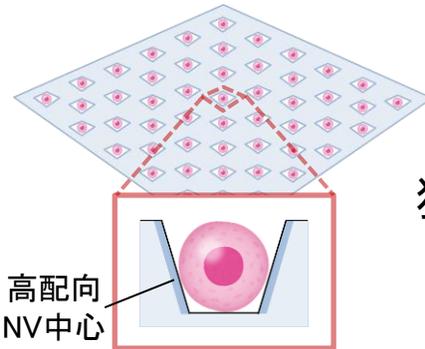
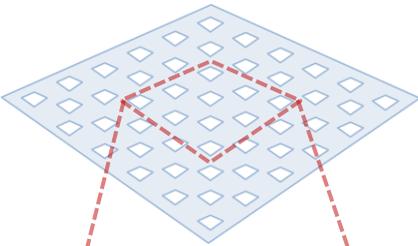
- ✓ 物情での学び（量子力学，物性，制御，回路，信号処理など）をフル活用
- ✓ 量子以外でも自分の興味に合わせたテーマ選定（プログラミング好きな学生歓迎！）

ダイヤモンド量子センサによる生体イメージング

生命活動の本質に迫る！

筑波大, 浜松医科大, 産総研, 名古屋大と共同研究

細胞・組織の
単離



高配向
NV中心

温度
イメージング



独自の量子制御技術により高感度化
(JAP2023)

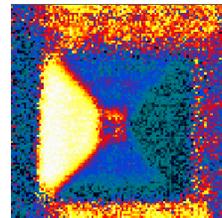
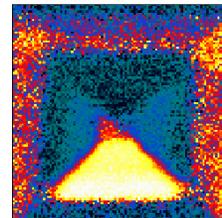
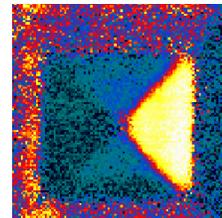
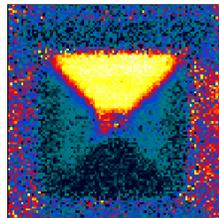
独自の作製技術 (IEEE Nanotechnol. 2016)

[111]

[111]

[111]

[111]



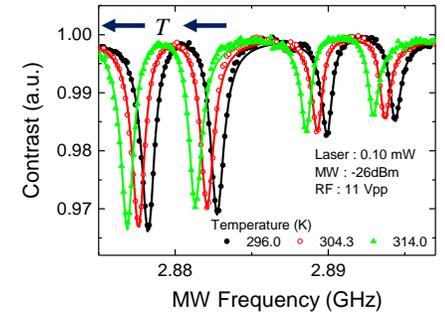
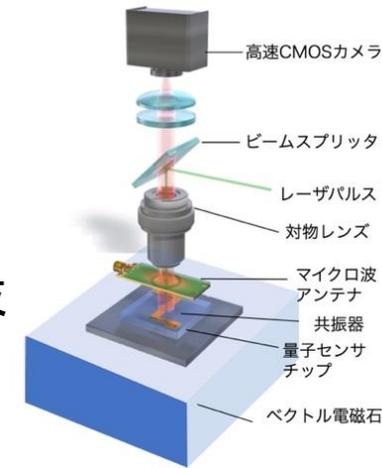
高配向NV中心の配向マッピング

NV量子センサ

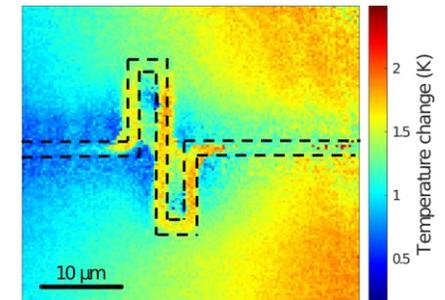
マイクロチャンバーアレイ

- 細胞や組織に合わせてサイズ・形状を自由に設計

- ホール壁面に高配向率 (>95%) NV中心形成
- ホール内部に細胞や組織を埋め込み高感度温度イメージングを実現



細胞単離テスト
(スピンコート)



温度イメージング

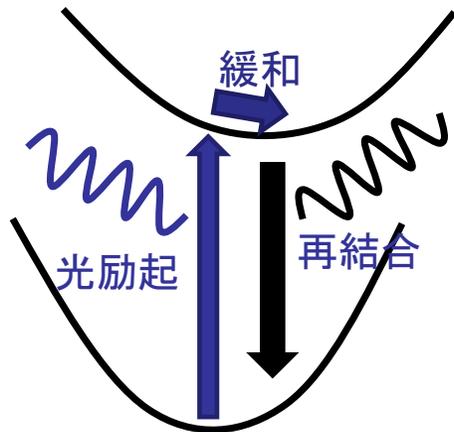
- NV電子スピン共鳴周波数のシフトから温度イメージを取得
- 独自の量子制御技術によりsub-K温度分解能・μm空間分解能を達成

ダイヤモンドNVセンターによる新たな量子状態生成

量子力学をとことん極めよう！

20超の研究室の参加する大型プロジェクト

従来の光科学



$$H_0 \gg H_{int}$$

物質系の相互作用 H_0
光と物質の相互作用 H_{int}

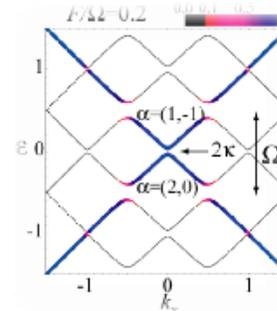
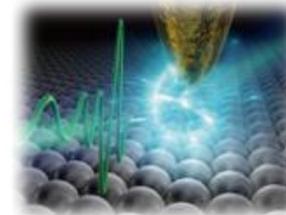
光励起・緩和で物質の
エネルギー状態は変わらない

光と物質が
分離できない
新領域

学術変革「光物質融合」

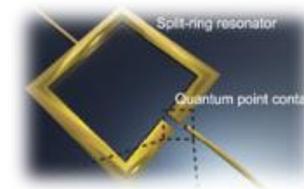
光が物質の一部となった融合状態の科学

【光の周期を超える】
トンネル非線形性を用いた
極限時空間分解制御



【物質状態を変える】
光電場駆動に基づく
新エネルギー状態の創成

【光機能を創出する】
光場制御に基づく光物質
強結合と光機能



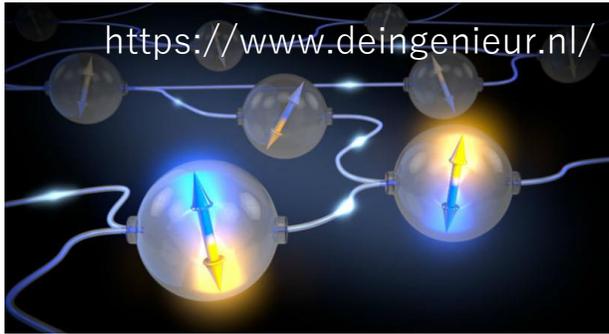
$$H_0 \sim H_{int}$$

光によるハミルトニアンエンジニアリング
光 (H_{int}) で物質のエネルギー状態 (H_0) を制御

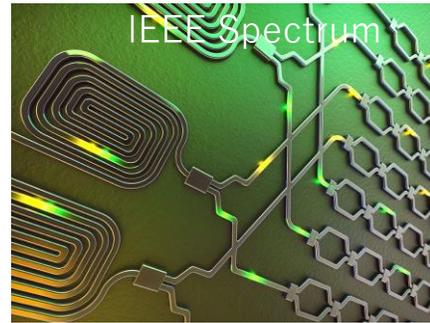
超高速非線形分光と量子ドットを用いた量子フォトンクス

光の量子性を制御して次世代の光量子技術を実現する

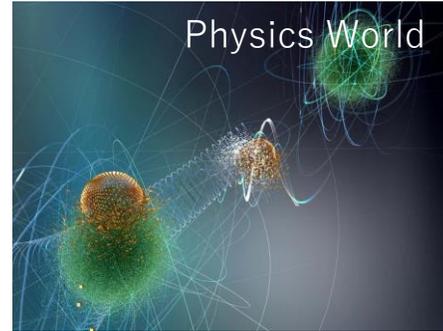
光の波動性 + 粒子性 (単一光子やもつれ合い光子) を活用



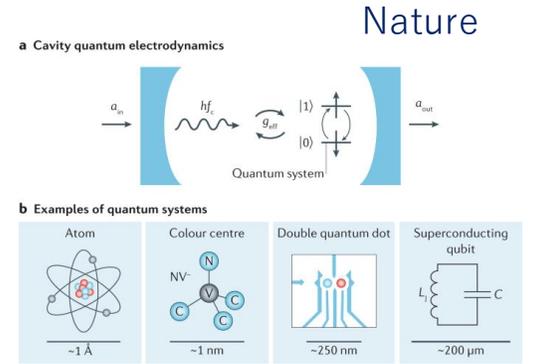
量子インターネット



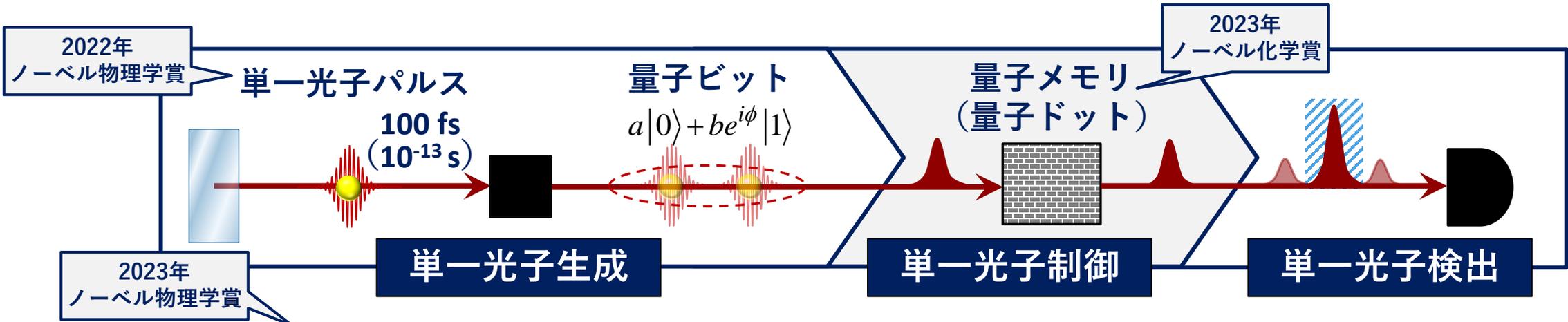
光量子コンピュータ



量子テレポーテーション



量子電磁力学

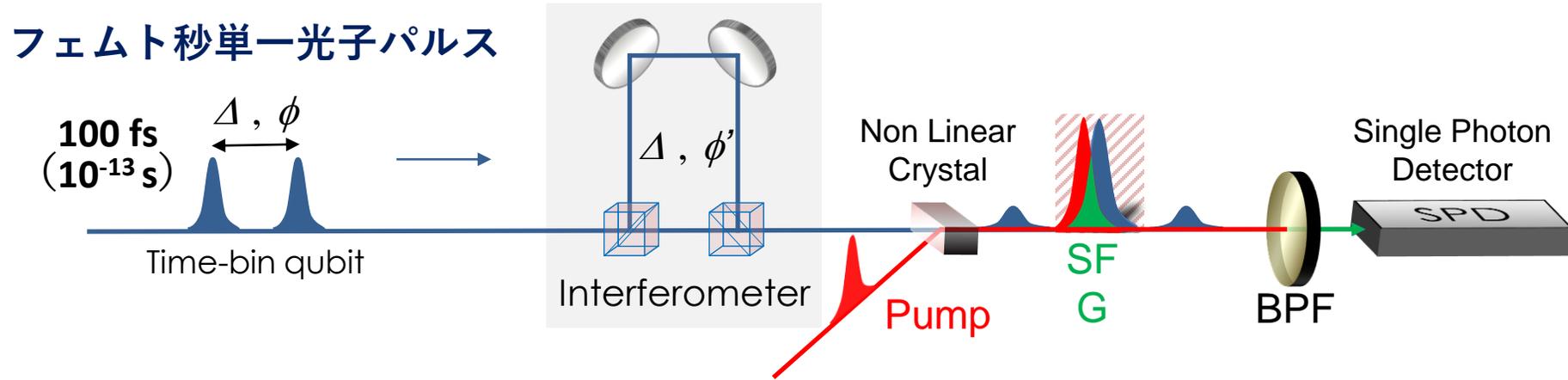


✓ 超高速 (フェムト秒) 領域の光子の生成・制御・検出技術の開発

超高速非線形分光と量子ドットを用いた量子フォトンクス

光の量子性を制御して次世代の光量子技術を実現する

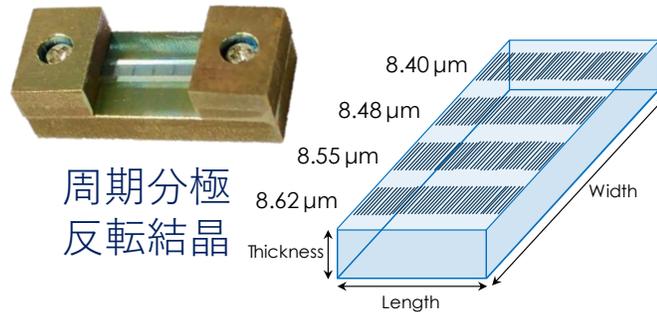
超高速非線形分光による単一光子重ね合わせ状態（量子ビット）の生成・検出技術開発



・光学系・
プログラムを自作



・非線形光学結晶の設計



物材機構（非線形光学結晶
研究の第一人者）と共同研究

河内君 (D1)



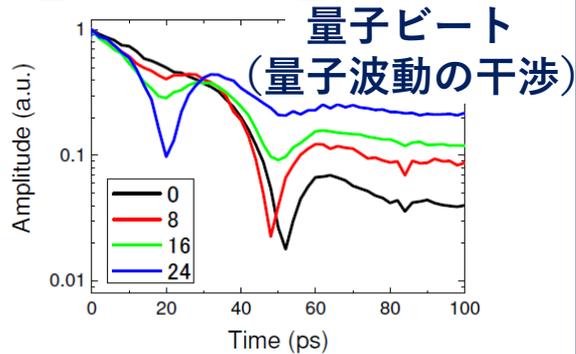
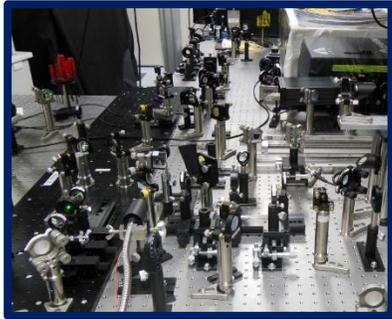
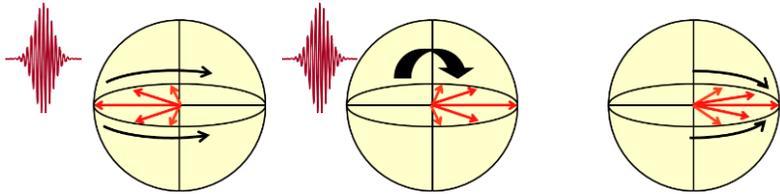
- 🏆 優秀卒論賞 受賞
- 🏆 優秀修論賞 受賞
- 🏆 フォトンクス分野注目発表に選出
- 🏆 NICT量子人材育成プログラム 採択 (研究費100万支給)
- 🏆 NTT海外研究所でのインターンシップ 採択
- 🏆 学振DC1 採択

超高速非線形分光と量子ドットを用いた量子フォトンクス

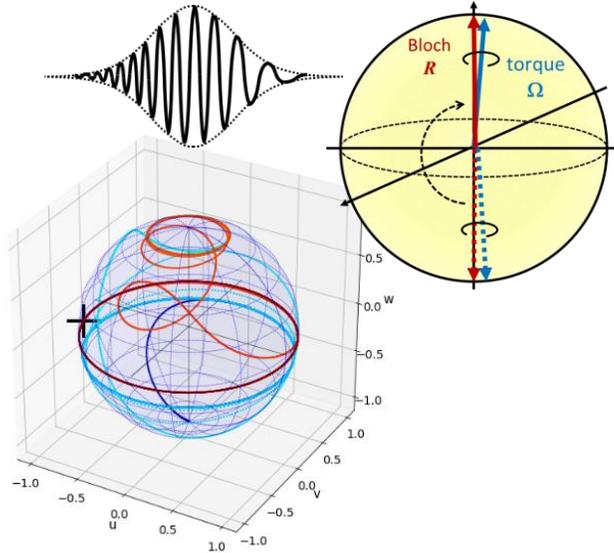
光の量子性を制御して次世代の光量子技術を実現する

超高速非線形分光による量子ドットの重ね合わせ状態（量子ビット）のフェムト秒コヒーレント制御

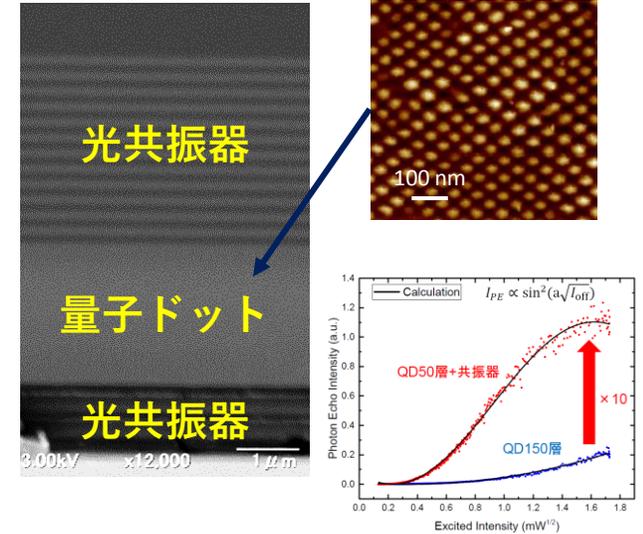
超電導量子コンピュータ（IBM Q）よりも4桁以上速い量子演算



- 電子の重ね合わせ状態（量子コヒーレンス）の超高速制御
- 量子メモリへの応用



- 特殊な光技術を用いた電子の量子状態制御法の開発



- 共振器 + 量子ドットで新規フォトンクス構造作製

✓ 超高速非線形分光 + 半導体ナノ構造で、
光子と電子の量子状態をどこまで自在に操れるのか？

量子インターネットの実現に向けて

もつれ合い光子で世界をつなぐ！



量子インターネットの応用例

- ・分散型量子計算
→量子コンピューターの処理能力向上
- ・量子セキュリティー、量子鍵の配送
→安全な量子通信、量子鍵の生成や配送
- ・ネットワーク量子センシング
→量子効果を利用した高感度のセンシング
- ・秘匿量子計算
→データやアルゴリズムを秘匿したまま量子計算
- ・量子ビットコイン
→破られない安全な暗号資産（仮想通貨） etc.



情報工学科
佐藤研



電気情報工学科
武岡研

二次元モアレ量子系を用いた固体量子シミュレーター

新奇低次元構造を用いて次世代の光量子技術を実現する

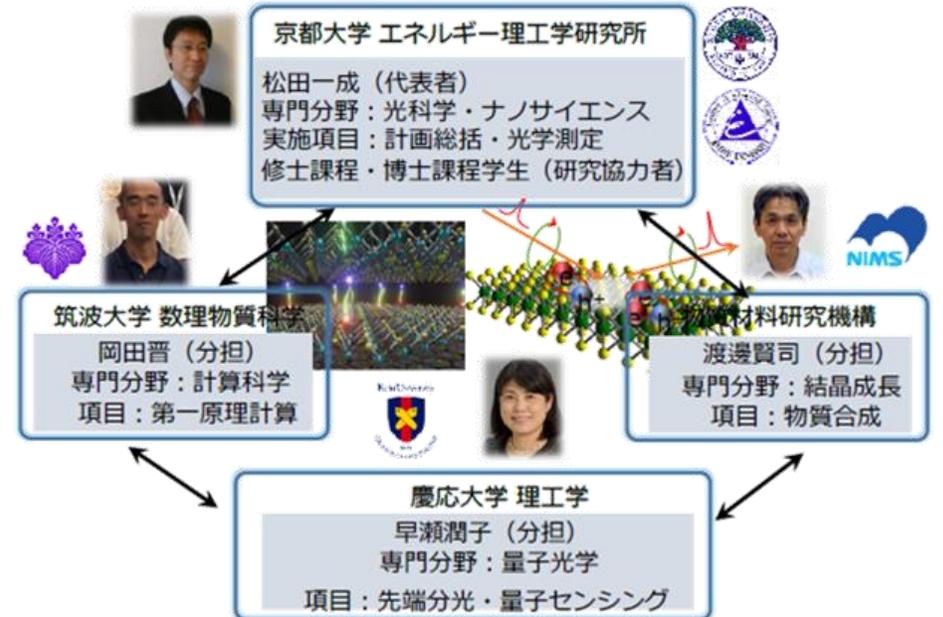
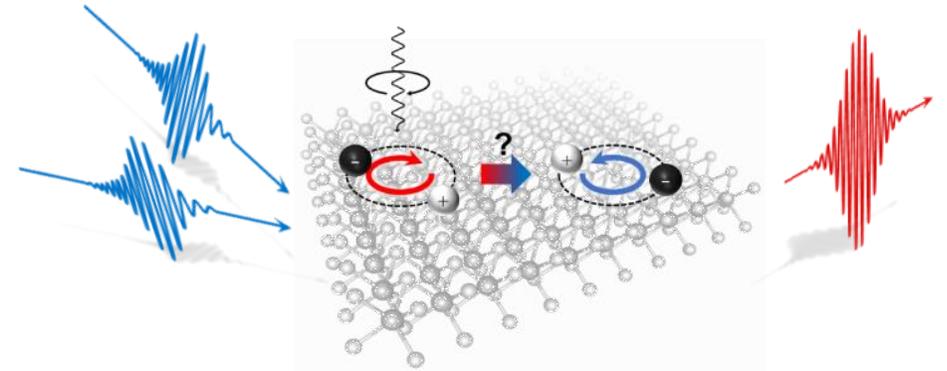
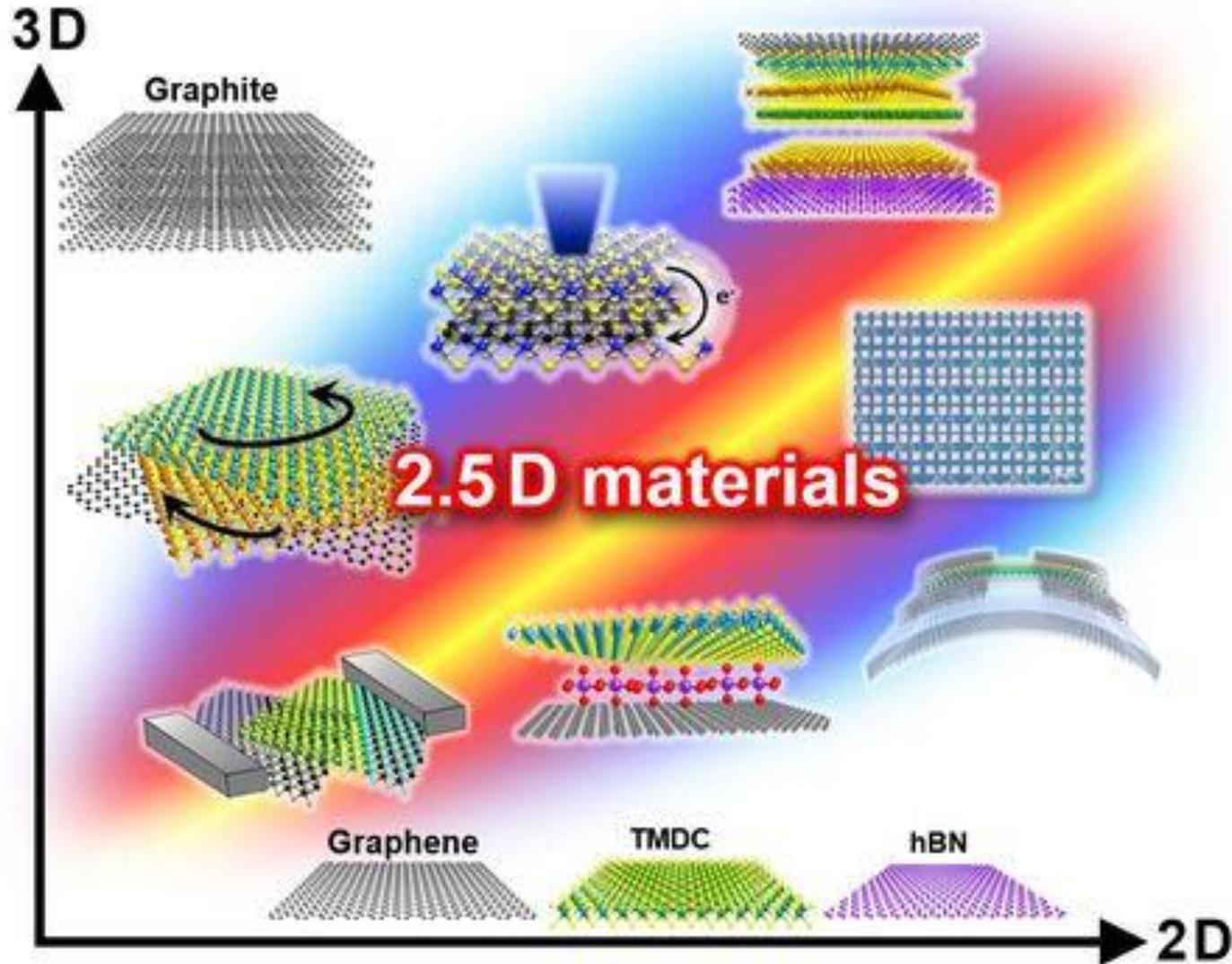


図8 研究協力体制

次世代光源～光周波数コム～を用いた分光技術

次世代の超高速オシロスコープを実現する！

2005年ノーベル物理学賞

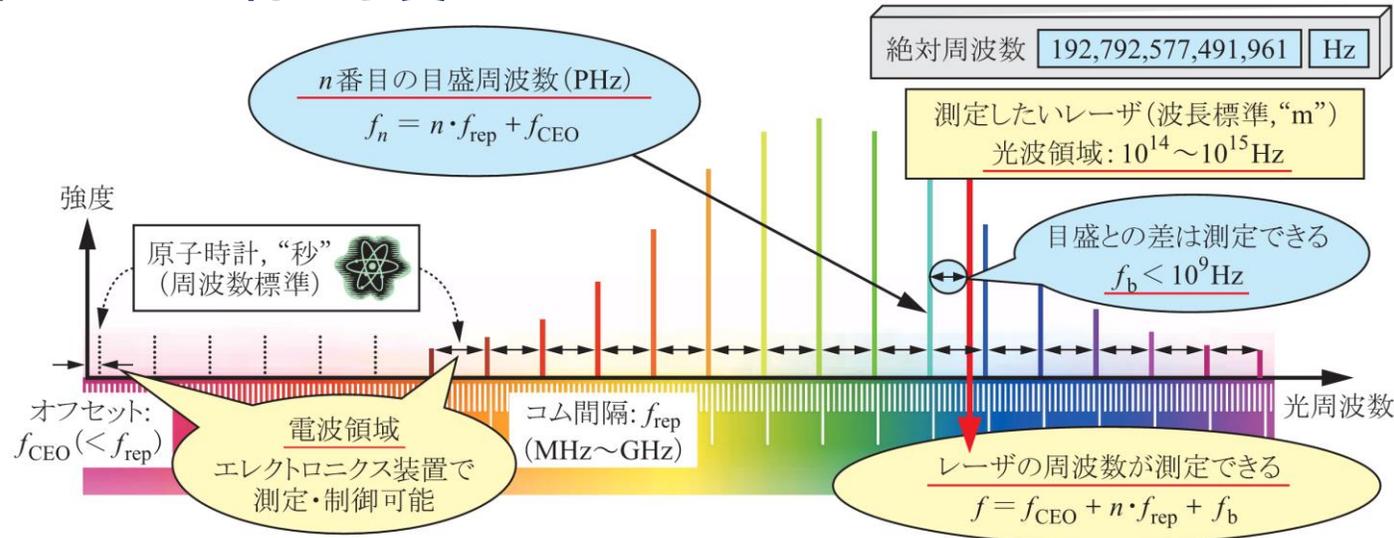
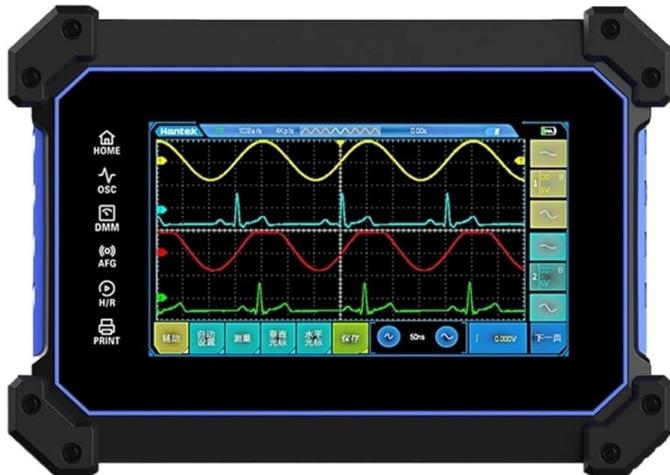


図2 光周波数コムによる「光の物差し」



横軸の時間分解能
オシロスコープ ms
(電子デバイスだとns限界)

光周波数コム技術で
時間分解能を10桁改善



物理学科
渡邊研



NICT
赤羽博士

光周波数コムで超高層フェムト秒オシロスコープを実現する！

量エレ研合宿研究会での交流が共同研究に発展



横軸の時間分解能
オシロスコープ ms
(電子デバイスだとns限界)

光周波数コム技術で
時間分解能を10桁改善

Sample: InGaAs bulk



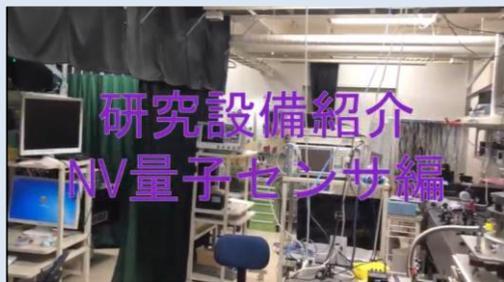
高い時間分解能 (~300 fs) と広い時間範囲 (17.7 ns) を
保ちながら, 積算時間を2桁短縮

新たな光技術による計測技術・量子制御技術の開発¹⁴

研究環境・設備，共同研究

最先端の研究装置が多数あり，かなり恵まれた研究環境です！共同研究も活発です！

研究設備（14-602，32-103A&B）



- ・最先端設備が充実！（フェムト秒レーザー2セット，NV用顕微鏡4セットなど）

- ・リモート実験も可。
- ・個人用PCを支給。

実験室ビデオ：

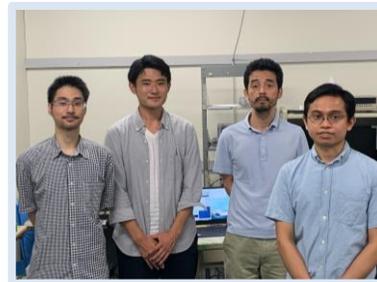
https://keio.box.com/s/fo3wm_d3yvpvi6k6529nth3xxvazk9a2q

外部共用設備



- ・国内有力研究所（NIMS，NICTなど）の最先端設備を利用可。
- ・スタッフがメンテナンスや技術指導，初心者への教育が充実。

共同研究



- ・大学や研究所，企業との共同研究が活発。
- ・一流の研究者との交流で成長。

有力研究ネットワーク参画

Center for Spintronics Research Network



- ・スピントロニクス・量子・光の各分野の有力研究室からなる研究ネットワークに参画。



光・量子飛躍
フラッグシッププログラム
(Q-LEAP)

- ・一流研究者との交流や研究費支援。

研究成果発表, スクール参加

国内外の学会や学術論文で積極的に成果発表しています。頑張っている学生を全力で支援します！

国際会議発表



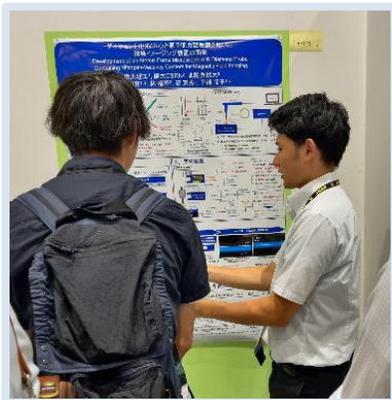
- ・ 修士は平均年1回は国際会議発表。
- ・ 費用は全額サポート。
- ・ 今年はスペイン, ドイツ, アメリカへ！

論文発表



- ・ 国際誌での学術論文発表。

国内学会発表



- ・ 応用物理学会, 日本物理学会などに参加。修士は1年1回以上は発表。
- ・ 費用は全額サポート。
- ・ 今年は沖縄, 熊本, 仙台へ！

スクール参加支援



- ・ 学ぶ目的のスクールや研究会参加も積極支援。
- ・ 今年はOISTサマースクール, 物性若手夏の学校に参加。費用支援。

国際性豊かな研究室

留学生の受け入れや海外留学が活発。海外大学院進学も積極的に支援します。

留学生との交流



- ・ 留学生（ドイツ，スウェーデン）が在籍。
- ・ 国際性や英語力が自然に身につく環境。

海外インターンシップ



- ・ アメリカ西海岸 NTT Physics&Informatics 研究所で短期インターンシップ。
- ・ 一流の研究所で量子の研究に従事。高額サポート。
- ・ 慶大から早瀬研が初参加。

海外大学院 進学

- ・ OBが海外の有力大学院に進学，研究で活躍。
- ・ 研究室紹介や推薦書作成など積極的に支援。



遠藤君（2014年学部卒）

イギリスOxford大で博士号取得。NTT研究所勤務。量子コンピュータ研究の若き先導者として，2021年度 Innovators Under 35 Japan受賞！

北村君（2017年学部卒）

ドイツの名門Ulm大学博士課程に在学中。ダイヤモンド量子センサ研究の世界的権威であるJelezko博士の研究室に所属。



五十川君（2022年学部卒）

アメリカMIT博士課程に進学。ダイヤモンド量子センサ研究の第一人者Cappellaro研究所。Chicago大，Oxford大にも合格。

在籍学生の最近の活躍

学生がそれぞれの得意分野で活躍できる機会を提供します。

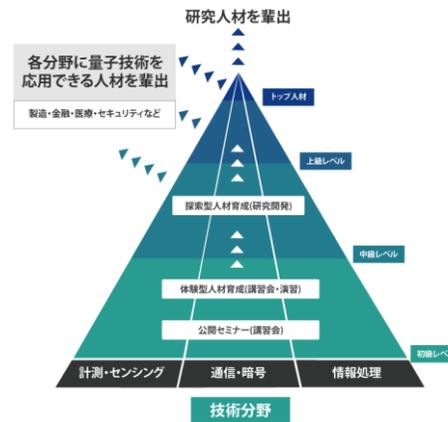
最近の受賞



- ・ 2020/2021年優秀卒論賞.
- ・ 2022年優秀修論賞 (3名)
- ・ 2023年研究奨励賞 (2名)
- ・ 応用物理学会フォトンクス研究会ポスター賞など.
- ・ 応用物理学会講演奨励賞
- ・ 過去受賞者も多数.



量子人材育成プログラム 採択



- ・ 全国から数件しか選ばれないNICT量子人材育成プログラム（探索型）に、3年連続採択の快挙！
- ・ 100万/1名の研究費。学生としては異例の額！

学振特別研究員 採択



- ・ 博士学生の登竜門である日本学術振興会特別研究員DC1（採択率20%以下）に2年連続採択.
- ・ 申請書執筆に関する有益なアドバイスとフィードバック.

卒業生の進路

それぞれの個性や希望に合った進路選択を応援します。海外大学院進学も積極的に支援します。

過去5年間の就職/進学実績

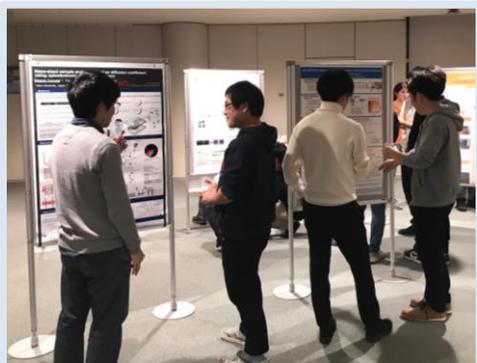
卒業年度	学部	修士
2019年度	慶大院3	NTT（研究所）、ソフトバンク
2020年度	慶大院4、東大院	村田製作所2、NTT東日本、東芝
2021年度	慶大院3、MIT院、三井物産	キオクシア、レーザーテック
2022年度	慶大院5	慶大院博士、東大院博士、ソニー2、野村総研
2023年度	慶大院2、東大院2、JAL、アドソル日進	慶大院博士、NTT物性基礎研、三菱UFJ銀行

- ・学部生の8割以上は大学院進学。うちほとんどは慶大院（早瀬研）進学。
- ・修士は大手メーカー、コンサルなどに就職。光（センサ）や半導体分野の研究開発職が多め。
- ・海外大学院進学や博士課程進学も積極支援。
- ・近年は、量子人材の需要の高まりにより、量子技術に関わる研究職への就職や、量子系の研究室への進学が増加。
- ・論理的思考力やプレゼン力をしっかり教育。就活や進学に強い研究室。

他大学・他研究室・OB/OGとの交流

“交流が人を育てる”をモットーに他大学・他研究室との交流の場を多く設けています

慶應光関連研究会



- ・ 慶應理工の光関連研究室が集まってポスター発表&ラボツアー。
- ・ 10年以上続いている伝統行事。参加研究室は10以上。
- ・ 学科を超えて交流。

外部研究室・研究所見学



- ・ 最近の見学先
海外（MIT, ハーバード大, スタンフォード大）
国内（NICT, OIST, 東京大, 京都大, 岡山大, 上智大, JAISTなど）

外部研究室や研究者との交流



- ・ 理科大電通大との研究交流会を毎年開催。
- ・ お花見やBBQ, 懇親会など研究以外の交流も盛ん。
- ・ 外部研究者による量子光科学セミナーの開催。

OB/OG会



- ・ 年1回社会人の先輩から話を聞く貴重なチャンス。
- ・ 留学経験のあるOBからの様々な支援も。

充実した研究環境で量子やってみませんか？



- ✓ 量子や光の実験に興味のある人
(理論中心でもOK)
- ✓ 実験装置をイチから組みたい人
(プログラミング・機械好き歓迎！)
- ✓ 人に伝える・伝わる力を磨きたい人
- ✓ 学会や研究会への参加に積極的な人
- ✓ 国際性・英語力を身につけたい人

難しい分だけやりがいのある量子。
研究室に入ってから勉強すれば大丈夫！
未来を変える量子技術と一緒に作りませんか？

2024度メンバー：
博士… 2名，修士… 9名
(留学生 1名)，B4… 5名



hayase@appi.keio.ac.jp



<https://www.appi.keio.ac.jp/hayase/>



@hayaselab

