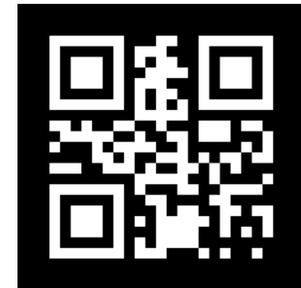




ムーンショット目標6 公開シンポジウム2024
誤り耐性型汎用量子コンピュータの実現を目指して
2024/3/27 16:25-16:55



QCNQC
QUANTUM CYBERSPACE WITH NETWORKED QUANTUM COMPUTER



ネットワーク型量子コンピュータ による量子サイバースペース

Quantum Cyberspace with Networked Quantum Computer

大阪大学

基礎工学研究科 物性物理工学領域

量子情報・量子生命研究センター(QIQB)

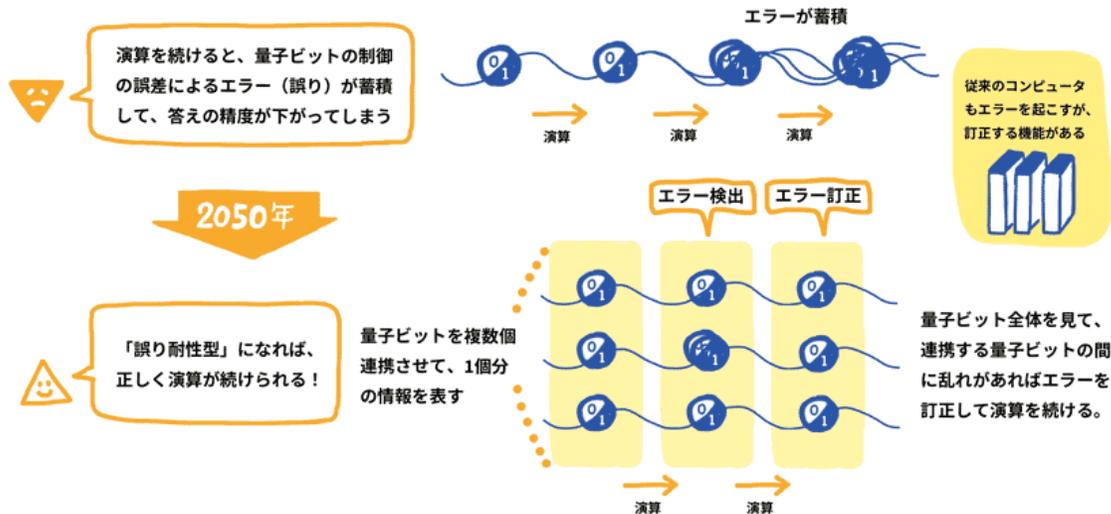
山本俊



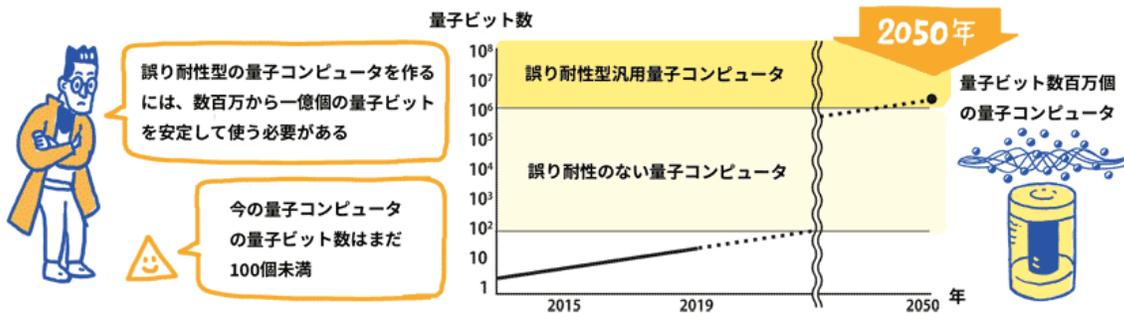
ムーンショット目標6

「2050年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる誤り耐性汎用量子コンピュータを実現」

量子ビットの間違いを正す: 誤り耐性汎用量子コンピュータの実現



もっとたくさんの量子ビットが必要！



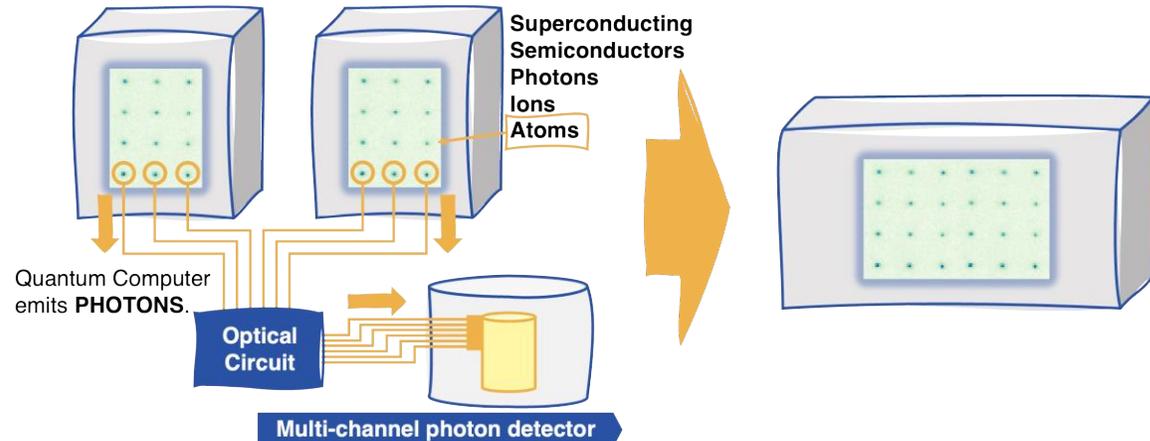
2050 大規模化を達成し、誤り耐性汎用量子コンピュータの実現

2040 分散処理型NISQ量子コンピュータの実証 量子誤り訂正下での有用タスク計算

2030 一定規模のNISQ量子コンピュータの開発と量子誤り訂正の有効性実証



ネットワーク型量子コンピュータによる量子サイバースペース



プロジェクト概要

様々な量子コンピュータを接続する手法をオールインクルーシブに研究



光、原子、半導体等の量子コンピュータハードウェアをネットワーク化するための要素技術を開発し、複数の中規模量子コンピュータを接続した「ネットワーク型量子コンピュータ」を構築する。それにより、2050年には、さらなる大規模化を進め、汎用的な量子コンピュータの実現を目指す。（70名以上参画）

量子インターフェース開発：4チーム

■ 原子ネットワーク型技術



■ 光子ネットワーク型技術



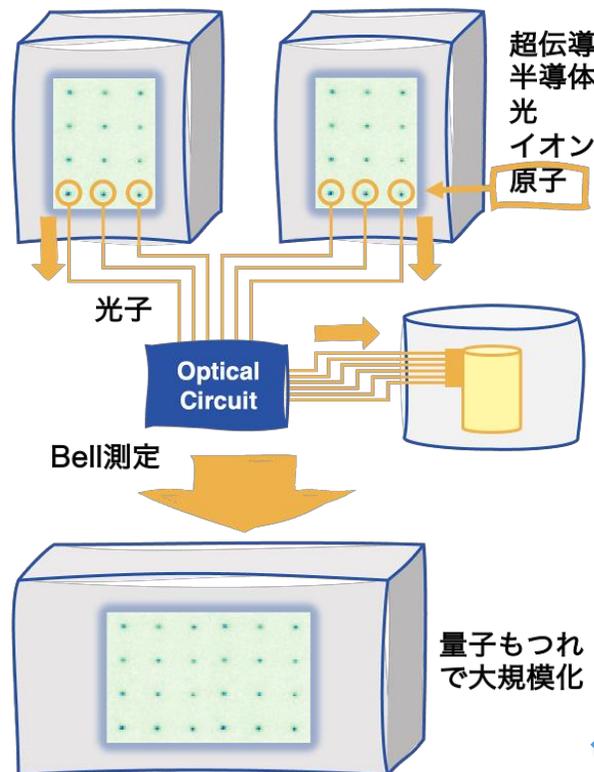
■ 半導体ネットワーク型技術



■ 超伝導ネットワーク型技術



ネットワーク型量子コンピュータ

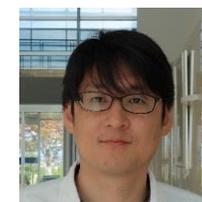


超伝導光子検出器開発：2チーム

■ 多重化光子検出器開発



■ 高性能光子検出技術開発



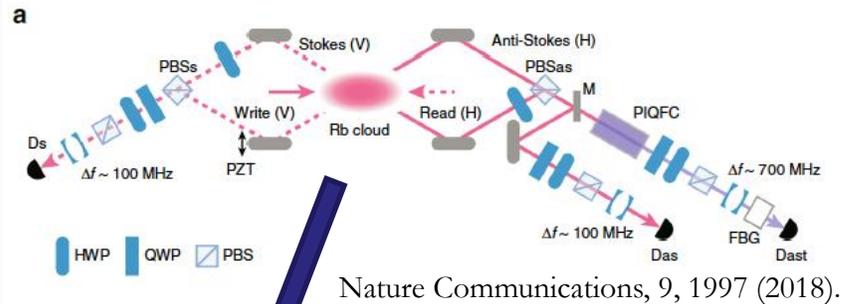
他プロジェクトとの連携

研究開発項目 1：原子ネットワーク型技術

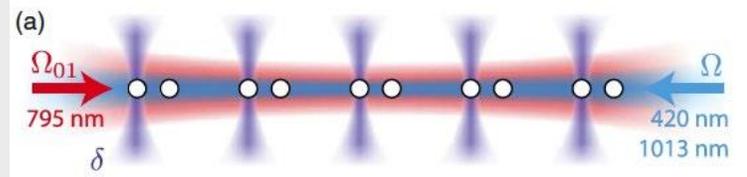
研究開発課題 1：原子・光多重化量子ネットワーク技術
(大阪大学 山本俊 基礎工学研究科・教授)



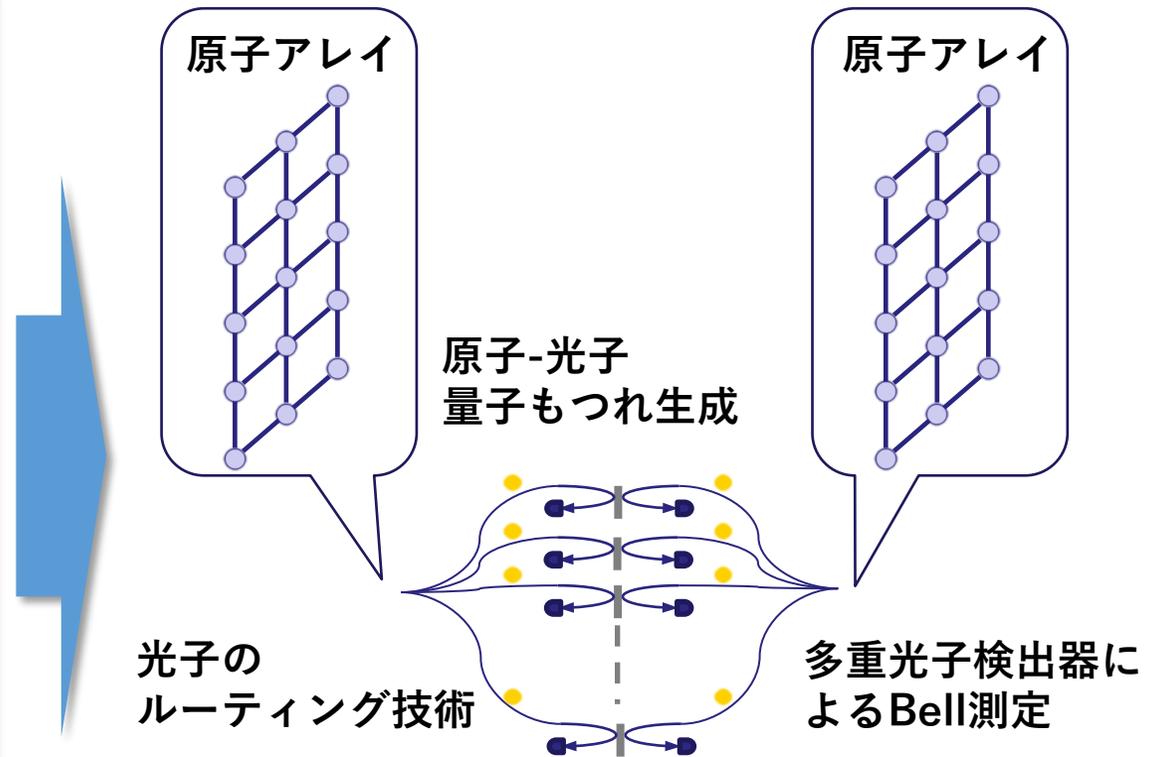
原子と光子の量子もつれ生成@大阪大学



原子アレイ量子コンピュータ



1次元原子アレイでのエンタングルメント
Fidelity > 95.0(2)%, Gate fidelity > 97.4(3)%
Harvard University (PRL **123**, 170503 2019)



他プロジェクト（高橋PJ、小芦PJ等）との連携

5年間の目標：原子光子エンタングルメントを生成し、原子アレイを接続する

➡ 原子系ネットワーク型量子コンピュータの要素技術を確立

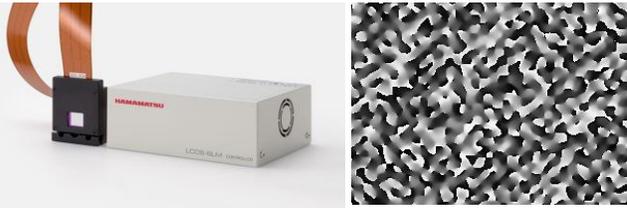


原子アレイと単一光子生成



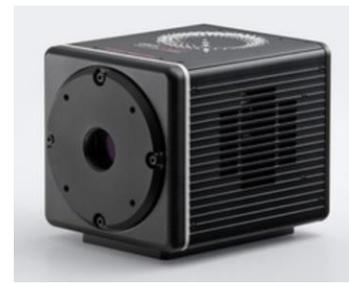
NICT-浜松ホトニクス
多重光子検出器

反射型SLM (ホログラム作成)



<https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-components/lcos-slm.html>

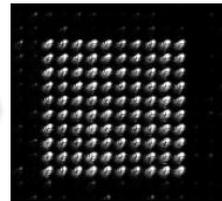
トラップビームアレイ



qCMOS Camera

蛍光観測

原子 (量子ビット) の2次元配列



トラップビームアレイの強度分布

原子



~100 mW

光子取り出し

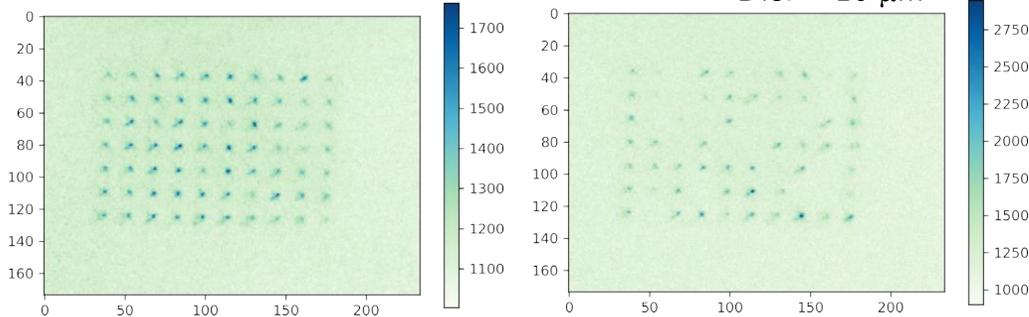
対物レンズ (NA0.7, res. < 0.7μm)

光子検出器

光学システム

7x10サイトの単一原子アレイ
(100枚の平均画像・single-shotでの画像)

Dis. ~10 μm



HAMAMATSU
PHOTON IS OUR BUSINESS

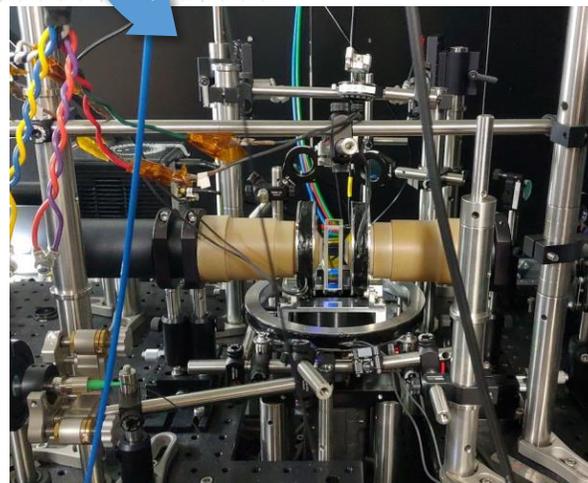
NICT
National Institute of Information and Communications Technology

量子もつれ光子で
12 ch動作評価済



林祥吾、村上翔一、小林俊輝、知名史博、三木茂人、寺井弘高、小玉剛史、澤谷恒明、大友昭彦、下井英樹、生田力三、山本俊“タンデム型type-II 疑似位相整合PPLN 導波路による非縮退光子対生成”第83回応用物理学会秋季学術講演会

* 原子からの光子は評価中



浜松ホトニクスHPに掲載中

HAMAMATSU 科学計測用カメラ
PHOTON IS OUR BUSINESS

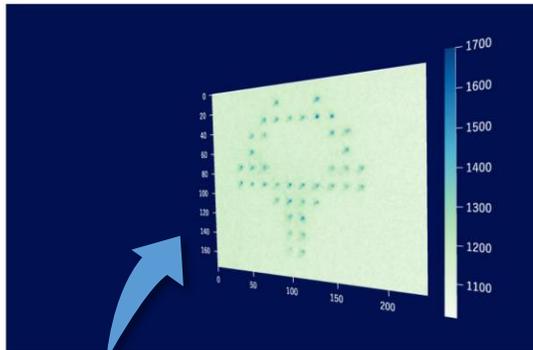
Corporate Site JPN

製品情報 知る・学ぶ ダウンロードセンター アプリケーション&事例集

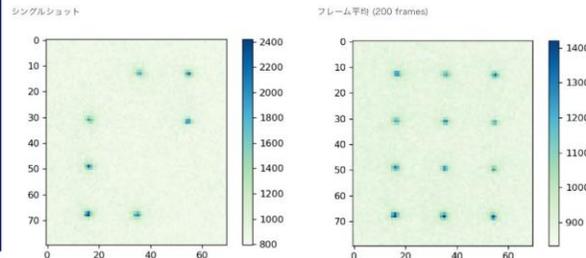
ホーム > アプリケーション&事例集 >

量子技術

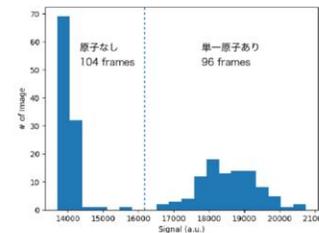
Neutral atom



原子量子コンピュータシステムに向けたORCA-Questを用いた原子アレイイメージング >



右下の原子サイトの輝度ヒストグラム (4 × 4 pixelのROI内の輝度値, 200 frames)



OSAKA UNIVERSITY

Virtual PHOTON FAIR 2023



PHOTON FAIR 2023
の展示や講演会・セミナーをWebで体感!

2024年4月20日まで



2024/4/20まで

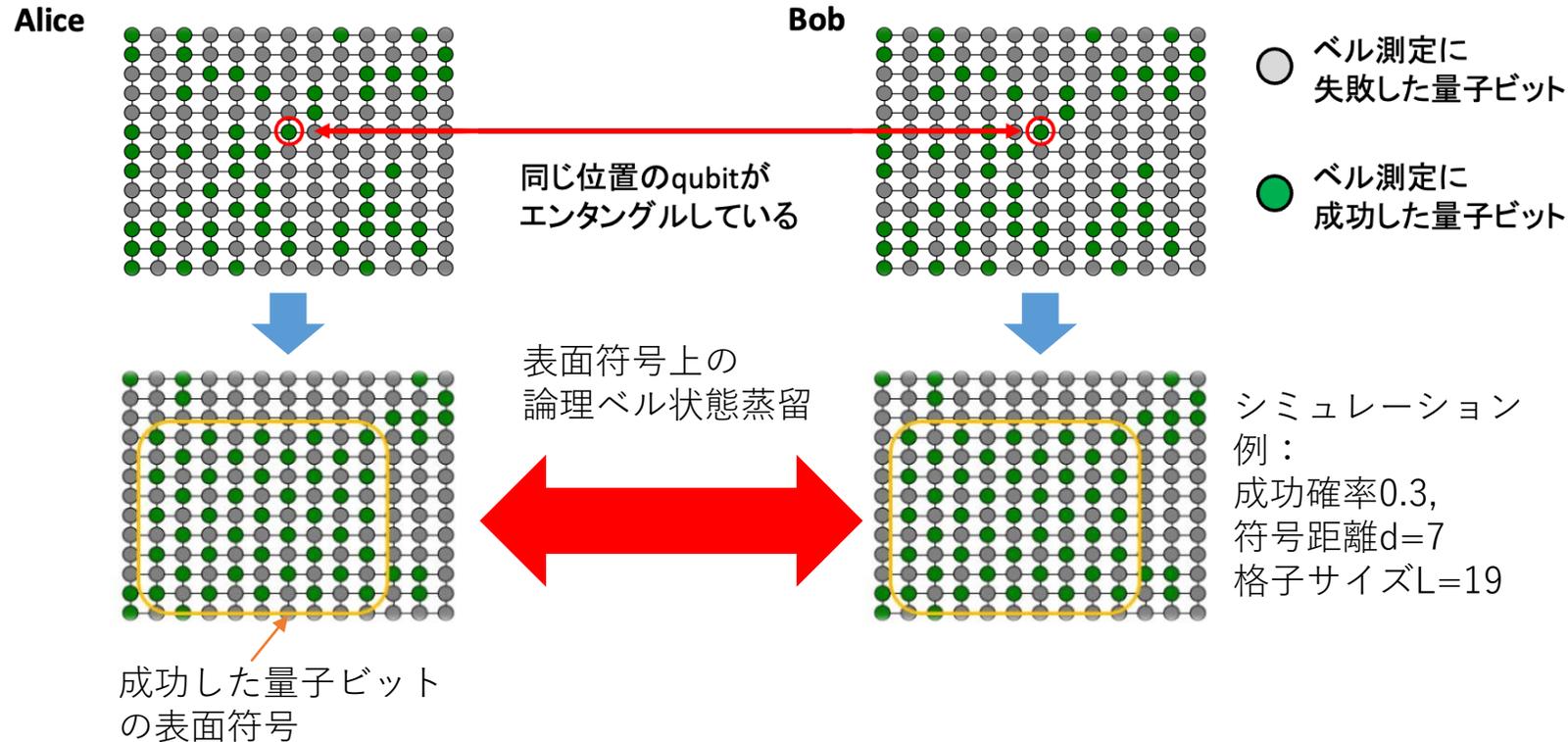
量子コンピュータ関連展示実施中

量子ビットアレイの大規模化プロトコル

理論・ソフトウェアとの連携 (小芦PM) : 分散量子計算プロトコル

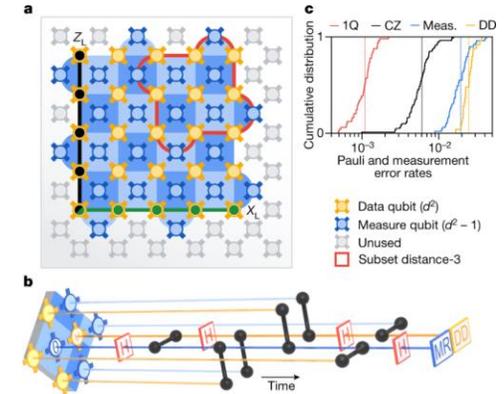


表面符号を用いた効率的な論理ベル (量子もつれ) 状態の蒸留

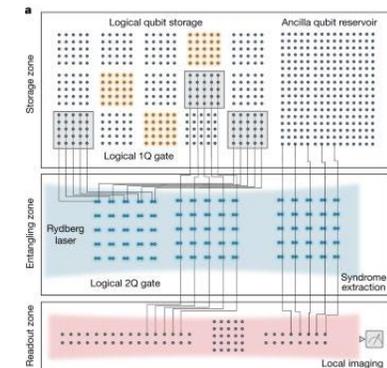


最近の量子コンピュータの進展

Suppressing quantum errors by scaling a surface code logical qubit, Nature 614, 676–681 (2023).



Logical quantum processor based on reconfigurable atom arrays, Nature 626, 58–65 (2024).

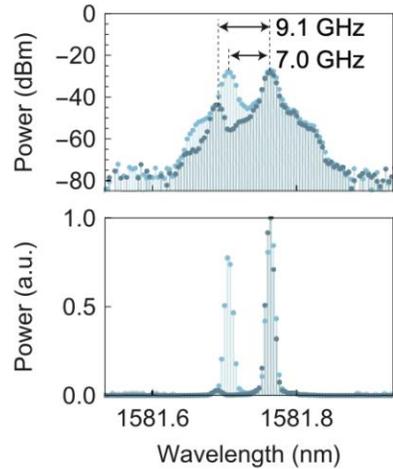
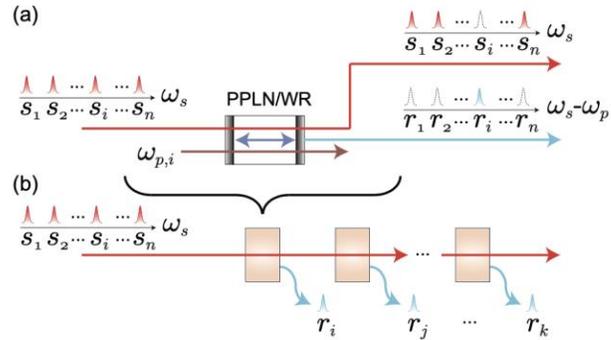


前田 雄也, 鈴木 泰成, 山本 俊, 徳永 裕己, 藤井 啓祐, "2次元格子に集積化された量子ビット間の表面符号を用いた効率的な論理ベル状態の蒸留" 第7回量子ソフトウェア研究発表会 セッション5-(14) 2022/10/27-28 大阪大学南部陽一郎ホール (豊中キャンパス) ハイブリッド開催

Yuya Maeda, Yasunari Suzuki, Toshiki Kobayashi, Yuuki Tokunaga, Takashi Yamamoto, Keisuke Fujii, "Logical entanglement distribution between distant 2D array qubits" as a poster presentation in 23rd Asian Quantum Information Science Conference, Seoul, Korea, August 28 - September 1, 2023



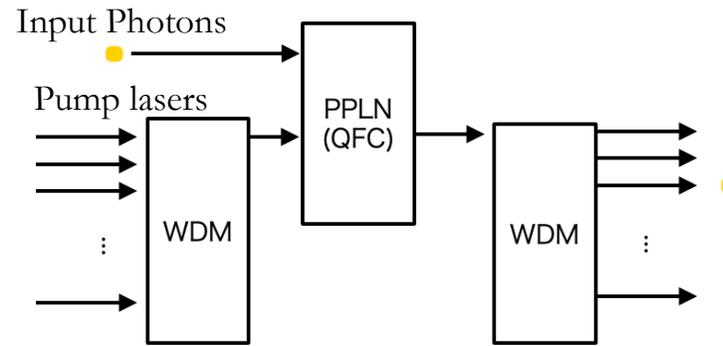
光周波数ピンセット Optical Frequency Tweezers



R. Ikuta, M. Yokota, T. Kobayashi, N. Imoto, T. Yamamoto, Physical Review Applied, 17, 034012 (2022).

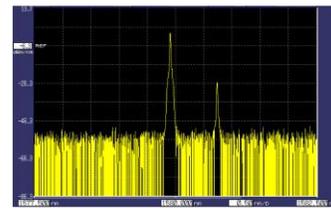
周波数変換による光子ルーティング技術

- ・ 高速ルーティング
- ・ 低損失



励起光 On/Off

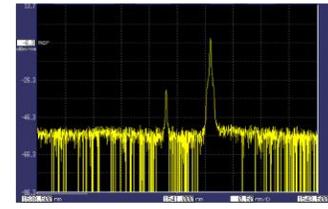
100 GHz
pump 1 pump 2



pump light ($\cong 1580$ nm)

光子 On/Off

100 GHz
conv. 2 conv. 1

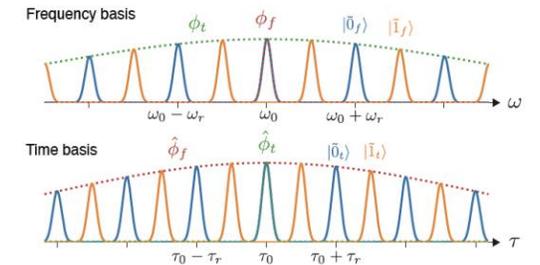


converted light ($\cong 1540$ nm)

2 ch ルーティングの実証

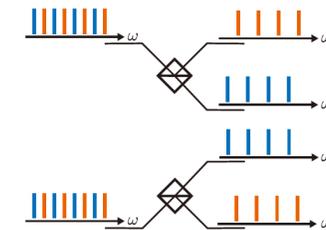
周波数多重化による量子計算新方式

- ・ 量子光周波数コムによる Time-Frequency GKP state



コム状の単一光子に状態をエンコード

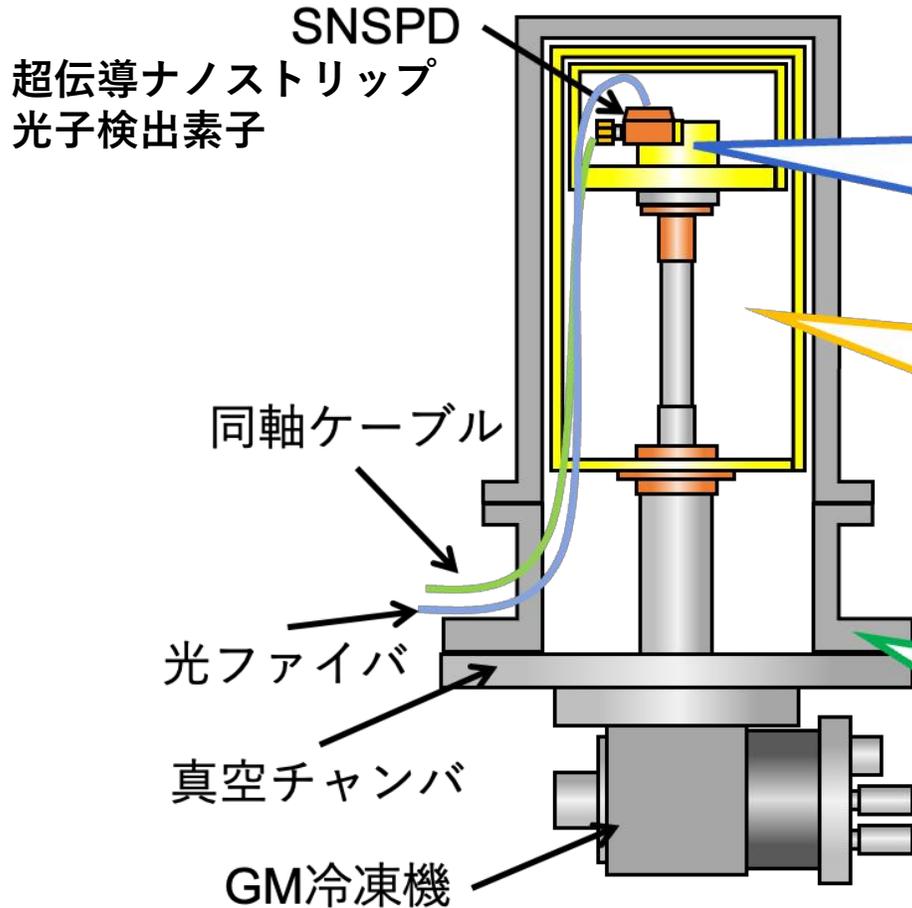
- ・ Optical interleaver (状態分離)



高時間分解能
光子検出

T. Yamazaki, T. Arizono, T. Kobayashi, R. Ikuta, T. Yamamoto, "Linear optical quantum computation with frequency-comb qubits and passive devices," PRL, 130, 20, 200602 (2023).

第8回応用物理学会フォトンクス奨励賞受賞



"SNSPD"の特性向上

- 通信波長1550 nmの感度・製造安定性向上
- 各種方式に合わせ紫外～可視光用素子の設計・作製・評価
- 高効率で安定生産可能な製造技術部を開発

"冷凍システム"の性能向上

- チャンネル数（搭載可能SNSPD）の拡大による多重化
- 信頼性の高い冷凍システムの開発
- 真空容器の設計、気密性向上による長時間連続稼働の実現

"多重化光子検出器"の評価・提供

- 多重化光子検出器としての特性評価
- 研究開発項目へ多重化光子検出器の提供、フィードバック
- 読み出し回路などのシステム全体の開発

SNSPD作製～多重化光子検出器の提供までトータルで開発が必要

5年間の目標：30 ch規模のシステム製造、トータル100 ch超の多重化

提供先	大阪大学 山本研 (MS01)
波長	1550 nm
Dark	< 100 cps
検出効率	70 ~ 82 %
Jitter	74 ~ 132 ps
チャンネル数	12 ch (1 ch調整中)

阪大ら、国産超伝導単一光子検出器システムを実証

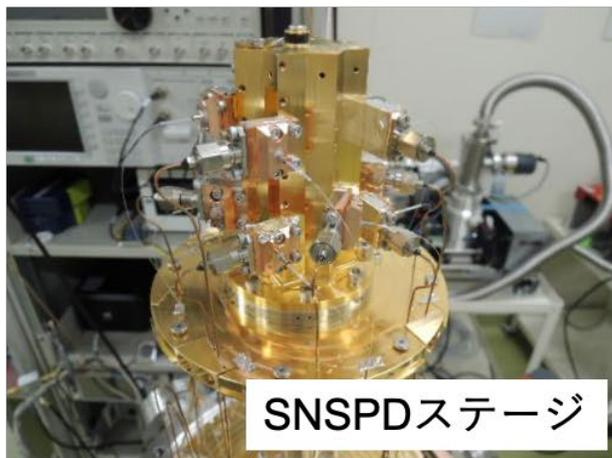
2022年09月16日 | カテゴリ: [PICK UP](#), [ニュース](#), [光関連技術](#), [科学・技術](#)

初号機@2022



大阪大学、浜松ホトニクス、情報通信研究機構（NICT）は、最大12チャンネルの超伝導ナノワイヤ単一光子検出器（SNSPD）システムを試作、フィールド実証を行ない、国産化への道筋をつけた（[ニュースリリース](#)）。

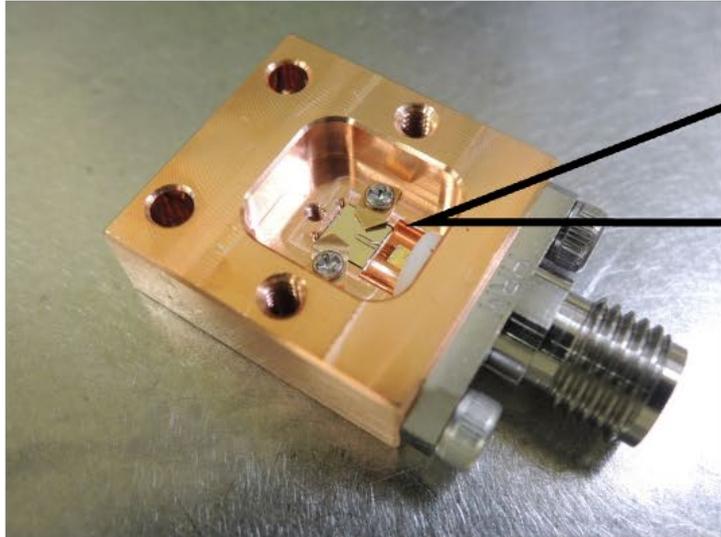
誤り耐性型汎用量子コンピュータの実現には、システムを1つ1つのモジュールに分割して、それらをネットワーク状に接続してネットワーク型量子コンピュータとすることが重要と考えられている。



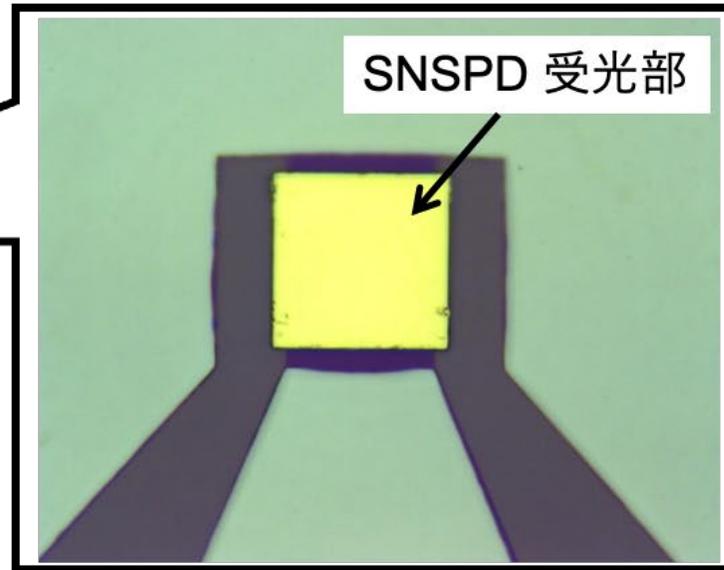
SNSPDシステムを提供。山本PMの下でフィールド実証に成功

導入した内製装置及び、社内既存装置を用いてSNSPDの成膜～パターンニングまで行い、SNSPDを作製した。(電子線描画のみ情報通信研究機構装置を使用)

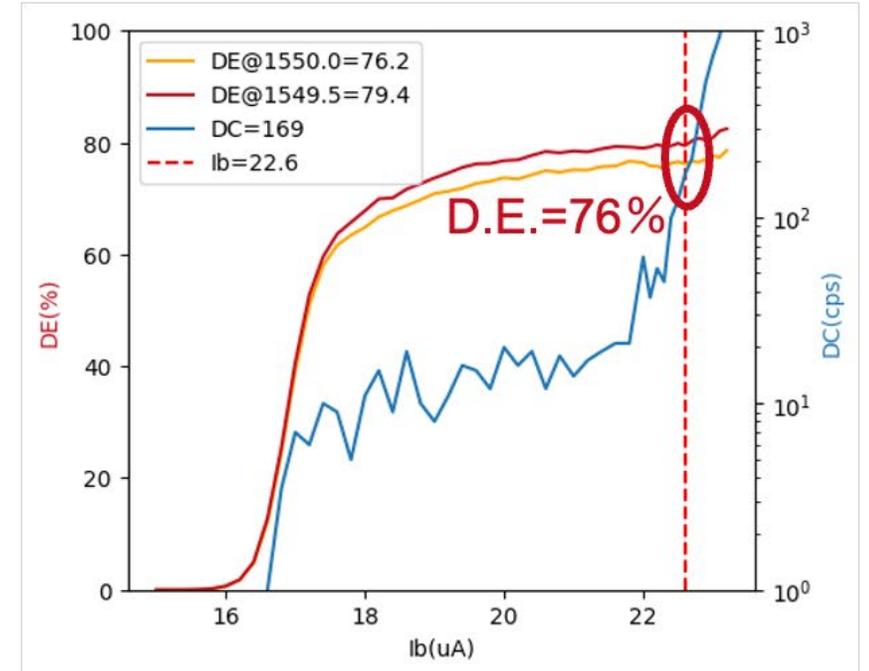
HPK 内製SNSPD



SNSPD受光部拡大図



SNSPD 光子検出効率vsバイアス電流



NICTの成膜装置、パターンニング装置で作製したサンプルと遜色ない光子検出効率D.E.=76%@1550 nmが得られた。
 → 浜松ホトニクスでの内製装置でのSNSPDの作製に成功

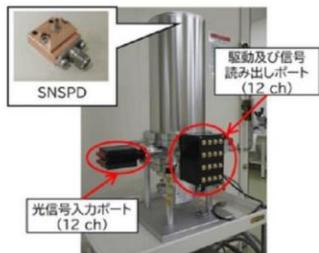
12 chから32 chシステムへ

冷凍機システム側の作成・評価

初号機 : 12 ch 超伝導光子検出器システム

阪大ら、国産超伝導単一光子検出器システムを実証

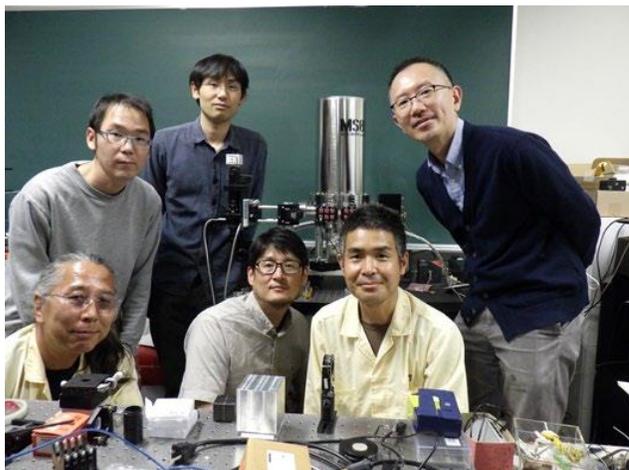
2022年09月16日 | カテゴリ : PICK UP , ニュース , 光関連技術 , 科学・技術



大阪大学、浜松ホトニクス、情報通信研究機構（NICT）は、最大12チャンネルの超伝導ナノワイヤ単一光子検出器（SNSPD）システムを試作、フィールド実証を行ない、国産化への道筋をつけた（ニュースリリース）。

誤り耐性型汎用量子コンピュータの実現には、システムを1つ1つのモジュールに分割して、それらをネットワーク状に接続してネットワーク型量子コンピュータとすることが重要と考えられている。

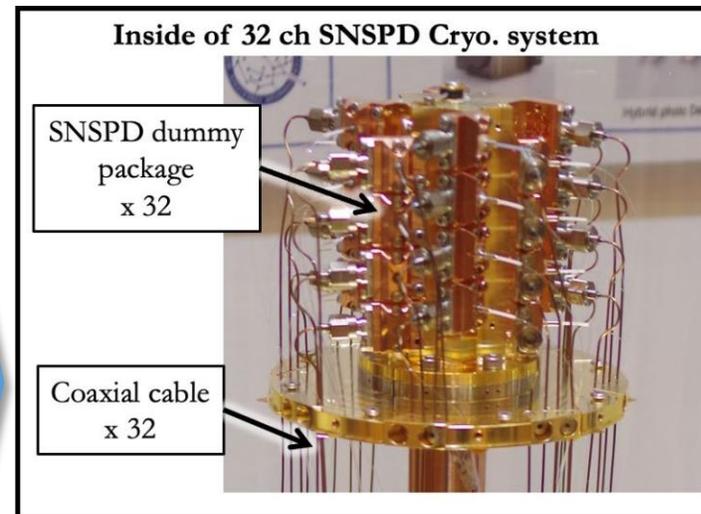
<https://optronics-media.com/news/20220916/78624/>



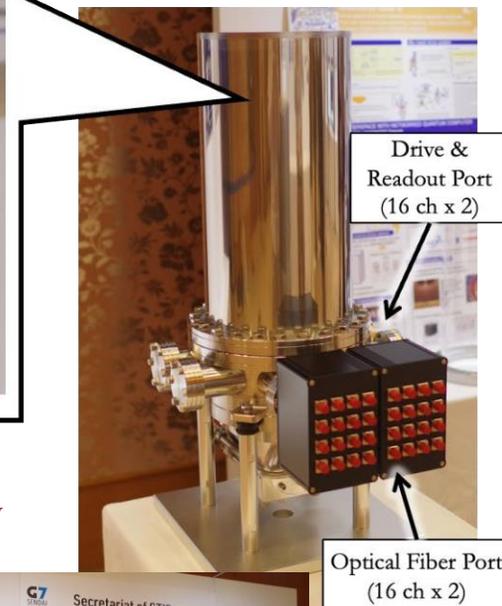
Destination	Osaka Univ. Yamamoto Lab (MS01)
Wavelength	1550 nm
Dark count	< 100 cps
Detection Efficiency	70 ~ 82 %
Jitter	74 ~ 132 ps
Channel	12 ch (1 ch under adjustment)

G7科学技術大臣会合

@May2023 32 ch 超伝導光子検出器システム



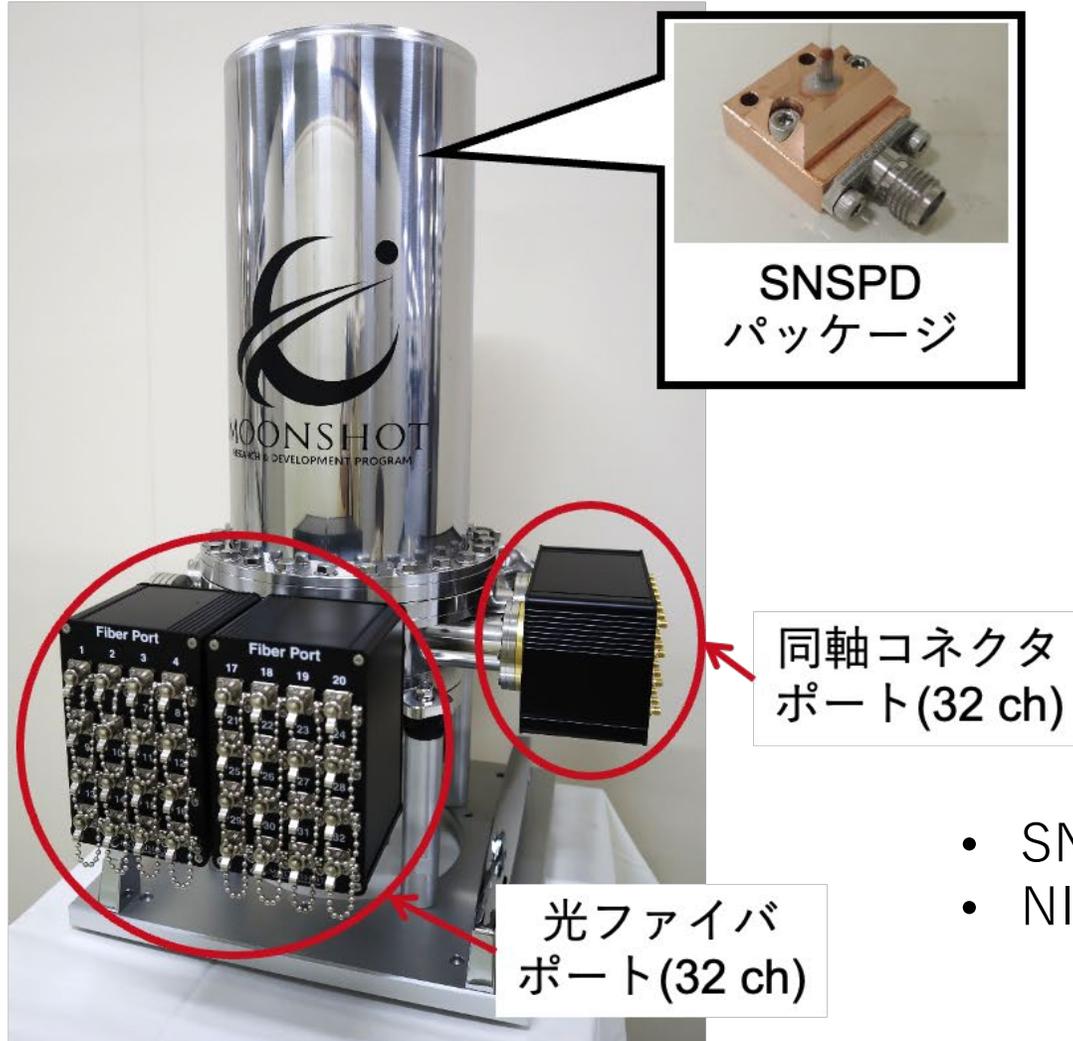
32 ch SNSPD System (under development)



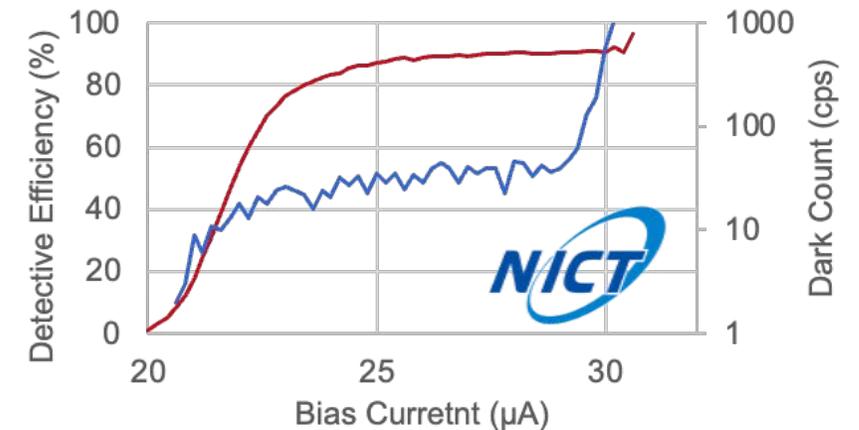
The largest channel number capability of the SNSPD systems from a private company



32 ch SNSPDシステム外観



提供先	大阪大学 山本研
波長	1550 nm
Dark	< 100 cps
検出効率	~ 90 %
チャンネル数	32 ch

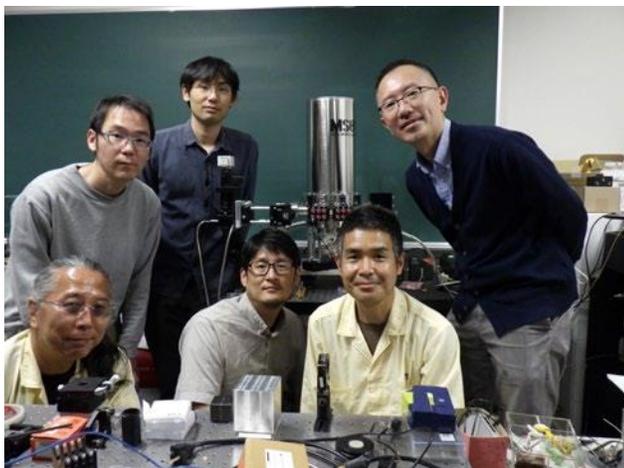


- SNSPD 32個搭載で到達温度2.15 Kを確認
- NICT製の高効率なSNSPDを搭載し特性を確認

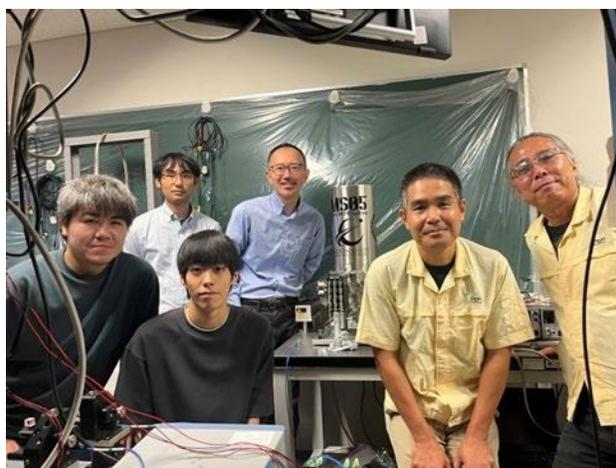
**国内最大Ch数を達成
世界最大級のCh数の実装に成功**

大阪大学 山本研究室 3システム

1550 nm, 12 ch



1550 nm, 12 ch



早稲田大学 青木研究室 1システム + 8ch 駆動ユニット x 2

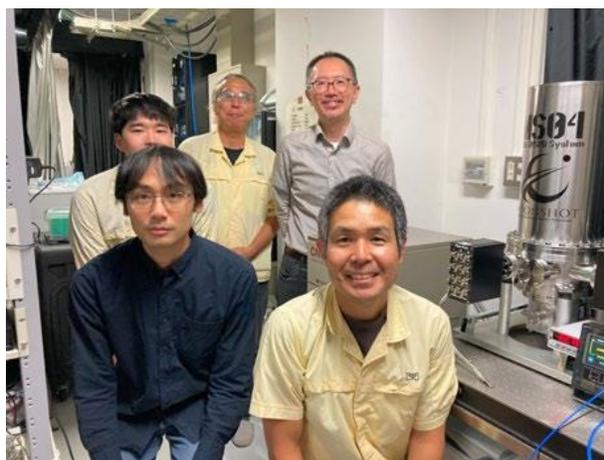
850, 1550 nm, 6 ch x 2 = 12 ch



量子もつれの検証に成功



780 nm, 12 ch



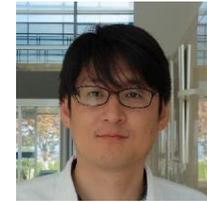
**引き続きSNSPDシステムの大規模化
・高感度化及び提供を継続**

高性能・多重化光子検出器

項目1-課題3：NICT超伝導ICT研究室 三木茂人 室長

超伝導ナノストリップ単一光子検出器 (SNSPD)：

高効率、広帯域、低暗計数率、低タイミングジッタ * 少数光子数であれば、光子数識別が可能



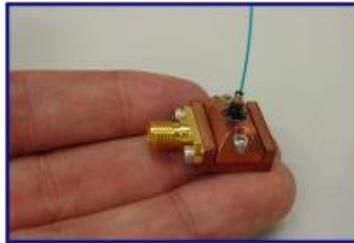
高性能SNSPDシステム開発

SNSPD応用

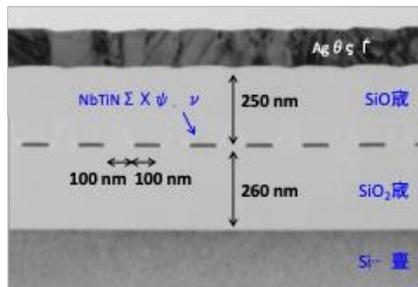
SNSPD高機能化



冷凍機システム

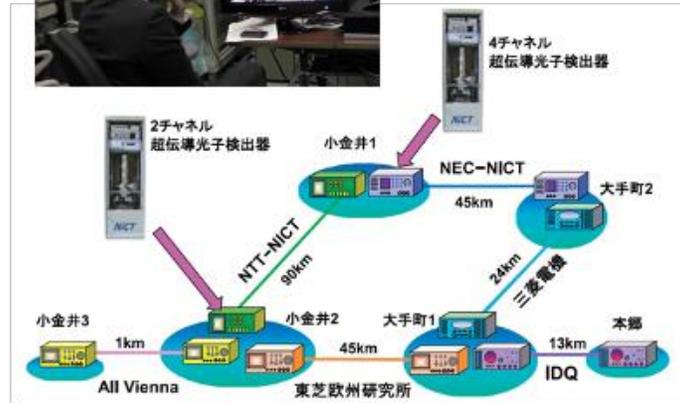


高光結合実装技術



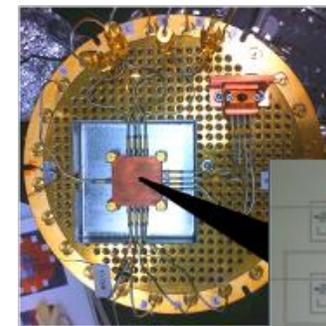
SSPD素子

検出効率80%($\lambda=1550\text{nm}$)を超える
SSPDシステムを開発[1]

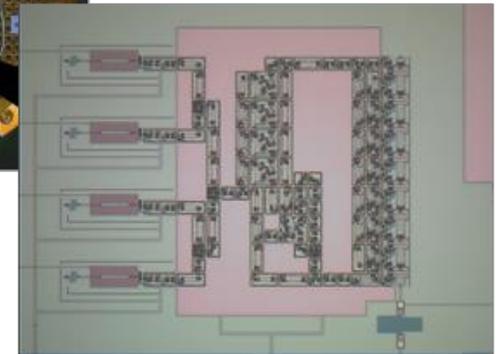


東京QKDネットワークデモ

量子暗号鍵配送[2]、量子光学[3]、バイオ応用[4]など様々な分野へのSSPD
応用を実施



冷凍機SFQ実装



SFQ素子写真

超伝導単一磁束量子(SFQ)回路を用いた
SSPDアレイ用信号処理技術世界に先駆
けて提案・動作実証[5,6]

[1] S. Miki et al., *Opt. Exp.* 21,10208 (2013) , [2] M. Sasaki et al., *Opt. Exp.* 19, 10387 (2013) [3] T. Kobayashi et al., *Nat. Phot.* 2016 [4] T. Yamashita et al., *Opt. Exp.* 22, 28783 (2014) [5] S. Miki et al., *APL* 99, 111108 (2011)



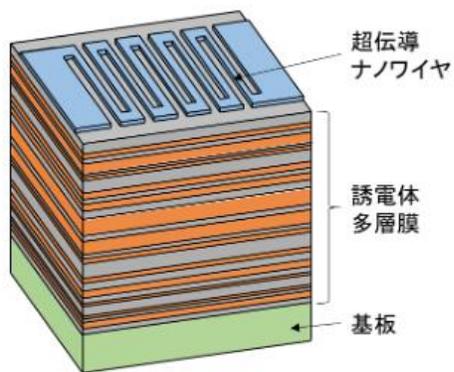
10年間の目標： ①検出効率 99 %、②数百チャンネル集積化技術

高性能化に関して

SNSPD性能・仕様

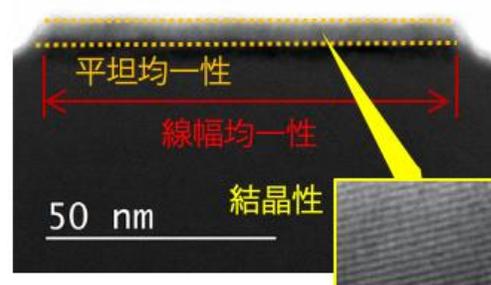
	対応波長 (nm)	検出効率 (%)	暗計数率 (カウント/秒)
現状性能	780、1550	~80%	~10
MS目標(5年)	310、710、780、850、1550	95%	0.1

イオン、原子、光などの各物理系に対応したSNSPD素子光学設計および設計に合致した素子作成技術の確立を実施する



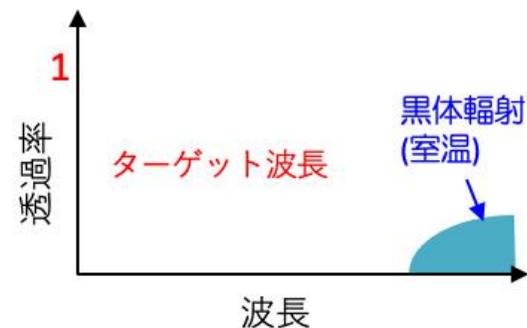
検出効率を決定づける各要素の最適化を実施する

- ・超伝導ナノワイヤ均一性の向上
- ・超伝導薄膜特性、結晶性の最適化
- ・光吸収率・光結合効率最適化



黒体輻射などの背景光を排除することが可能な技術開発を実施

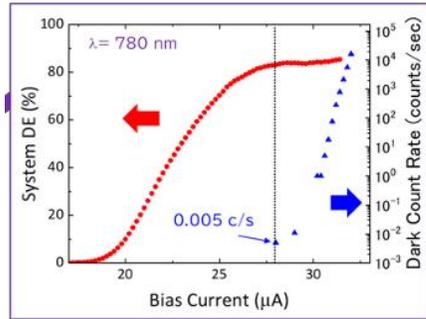
- ・光学多層膜フィルタ
- ・ファイバブラックグレーティング(FBG)



高性能化に関して

高効率化と低暗計数率の両立を目指して

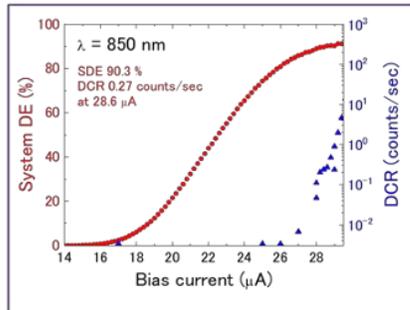
これまで高効率と低暗計数率を独立に実現



システム検出効率・暗計数率のバイアス電流依存性

780nm用SNSPD素子

暗計数率 0.005 c/s

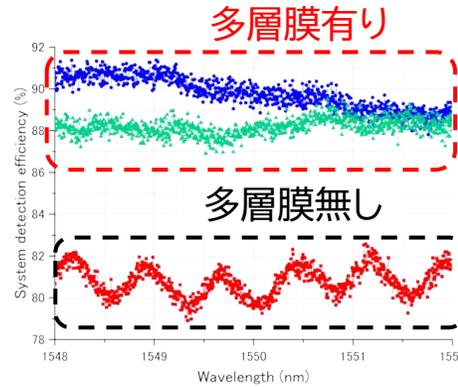
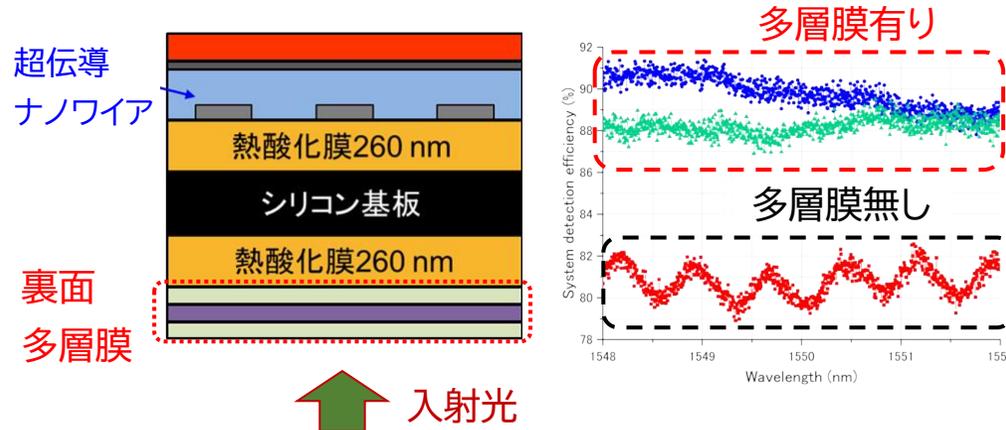


システム検出効率・暗計数率のバイアス電流依存性 (波長依存性測定素子とは異なる素子)

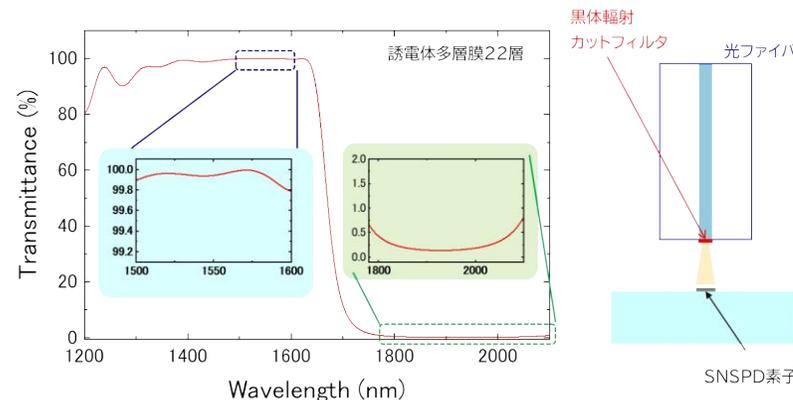
850nm用SNSPD素子

検出効率 90.3 %

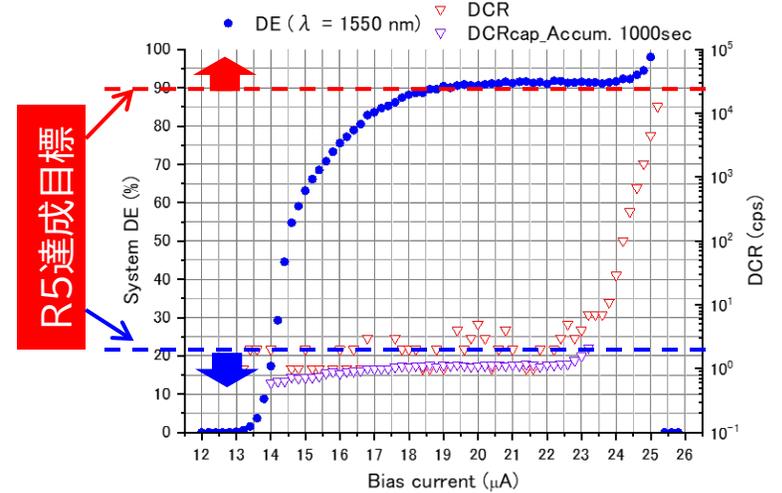
A. 入射光の干渉を低減するためウェハ裏面に多層膜を具備



B. 入射光導入光ファイバ端面に多層膜フィルタを具備



A、Bを導入したSNSPD素子の検出効率および暗計数率測定結果



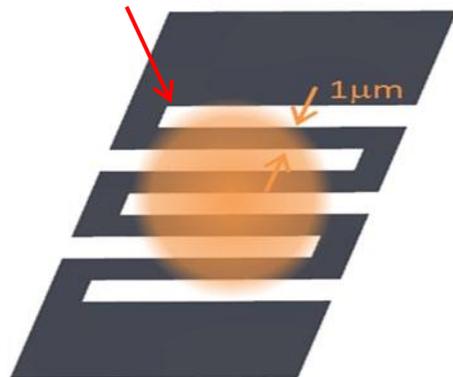
$\lambda = 1550\text{nm}$ における
システム検出効率: 91.8 %
暗計数率: 1.136 c/s

通信波長帯においてR5年度MS目標を達成

超伝導ワイドストリップ光子検出器(SWSPD)

新奇構造の超伝導光子検出器の発見

入射光スポット



SMSPD

1μm以上のストリップ幅を有する超伝導マイクロストリップ光子検出器 (SMSPD)の実証 [1]

○ 汎用的な光リソグラフィ技術で作製可能

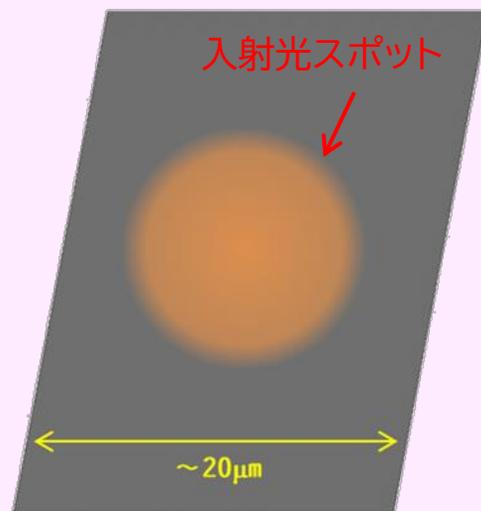
[1] Phys. Rev. Applied 9, 064037 (2018)

→ 生産性向上、生産コスト削減

× 高効率光結合にはメアング形状が必要

→ 構造が性能を制限

Our
Challenge



SWSPD

光スポット径 < ストリップ幅

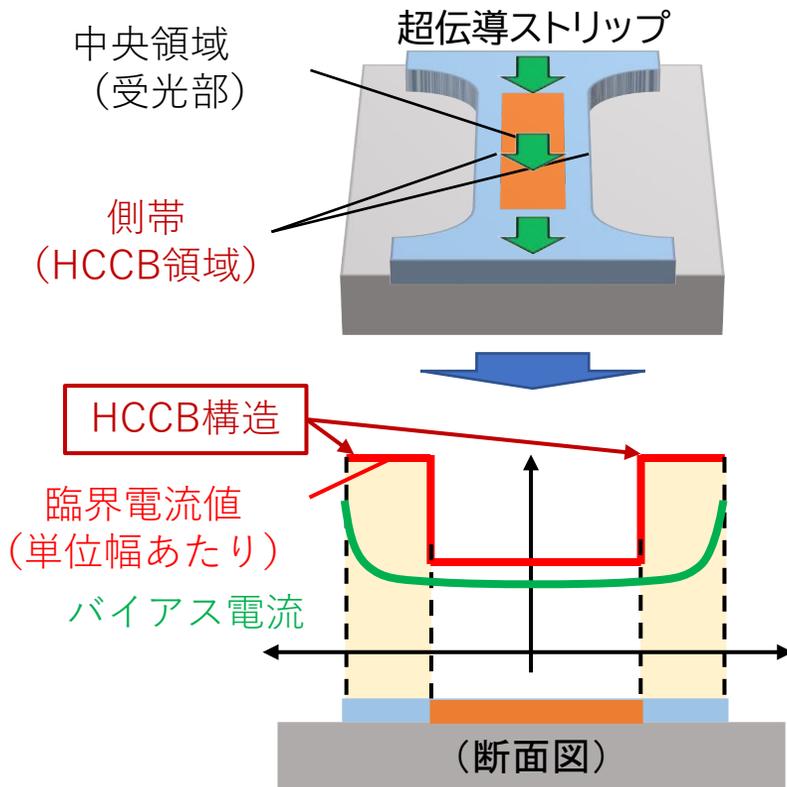
構造による性能制限から脱却

超伝導ワイドストリップ光子検出器
(SWSPD)の研究開発

超伝導ワイドストリップ光子検出器(SWSPD)

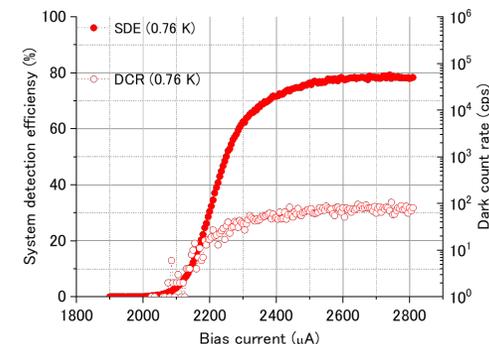
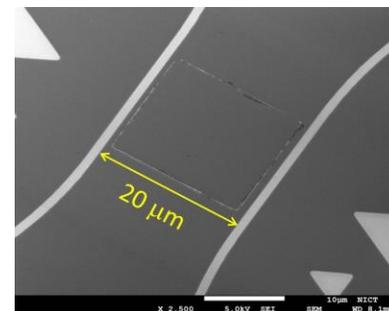
新奇構造の超伝導光子検出器の発見

新奇構造の提案 (特許出願済)



エッジ部分に高臨界電流バンク
(High Critical Current Bank: **HCCB**)構造を形成

幅 $20\mu\text{m}$ の超伝導ストリップで高性能光子検出動作に世界初成功



- 検出効率 78%
- 暗計数率 50 c/s
- 偏光無依存特性
- タイミングジッタ 29ps

SNSPDと同等

SNSPDを凌駕

M. Yabuno et al., Optica Quantum 1, 26 (2023).

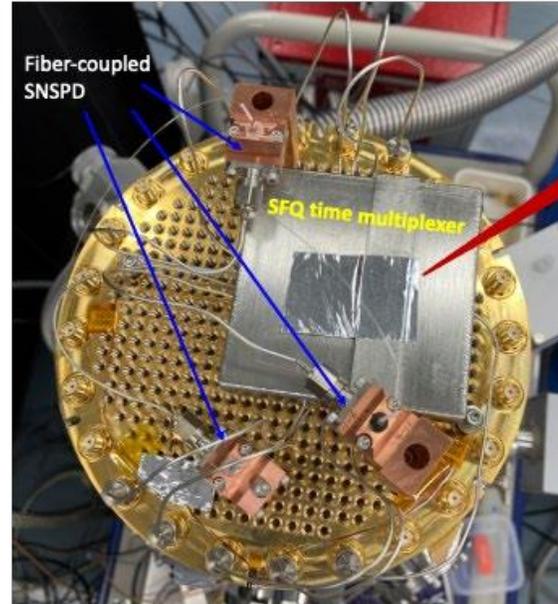
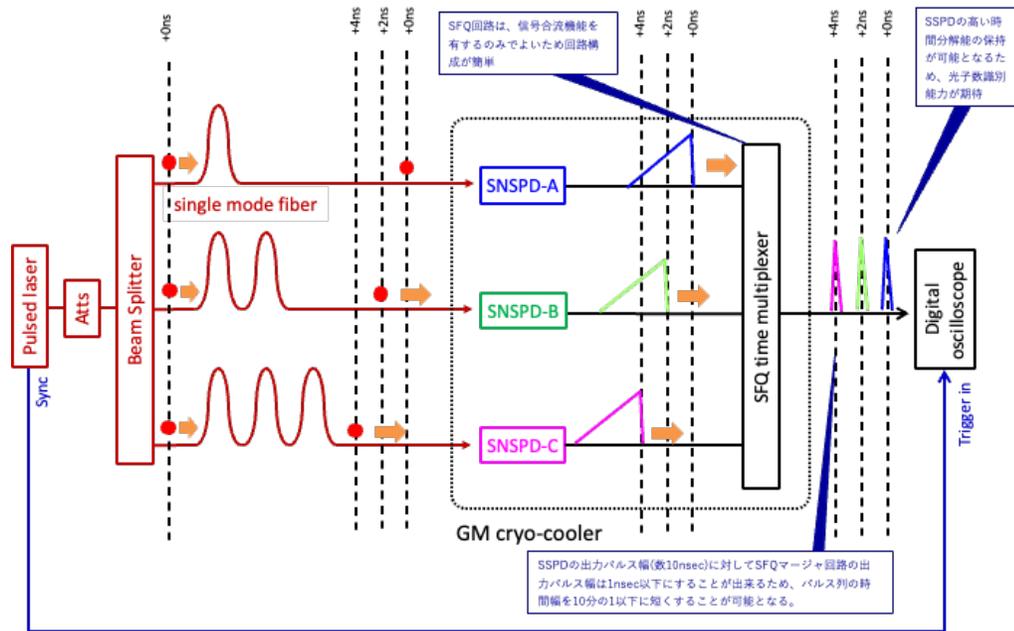
プレスリリース：2023年10月30日

世界初、“超伝導ワイドストリップ光子検出器”の開発に成功

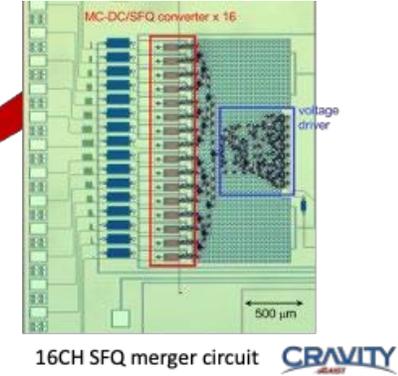
～従来のナノストリップ型の200倍以上のストリップ幅で、高性能を実現～

SNSPDの集積化に関する研究開発

高性能SNSPDアレイ作成技術開発



3個のSNSPD + SFQ回路実装写真



- SNSPD-A, B, Cの出力とSFQ時間多重回路が冷凍機内で接続
- 各SNSPDへのバイアス電流はSFQ内抵抗を介して、並列に印加
- SFQ回路へのバイアス電流：

$I_{MC-DC/SFQ} = 11.3\text{mA}$	➡ 冷凍機動作温度 2.16 K → 2.2K
$I_{Main} = 35.1\text{ mA}$	
$I_{driver} = 36.8\text{ mA}$	

- 量子コンピュータを構成するデバイスとの集積化

高橋PMとの連携進行中

高橋PMのもとで推進するイオントラップデバイスなどとSNSPDの集積化可能性を探る

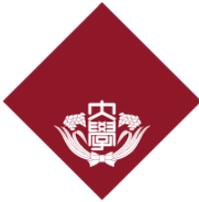
- 特許出願

古澤PMとの連携

同時計数回路：1件、光子数識別：1件、ナノストリップ製造法：1件、出力波形整形手法：1件

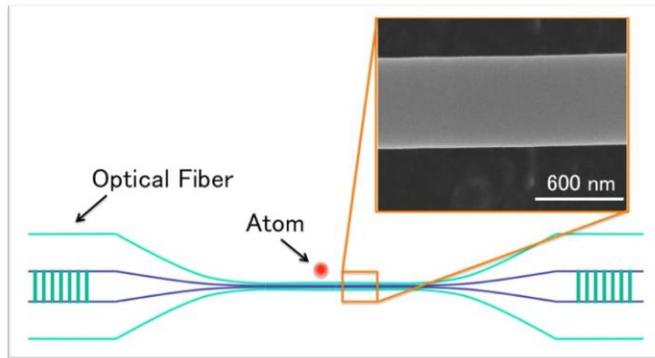
研究開発項目2：光子ネットワーク型技術

研究開発課題1：共振器QED量子ネットワーク化技術
(早稲田大学 青木隆朗 理工学院・教授)

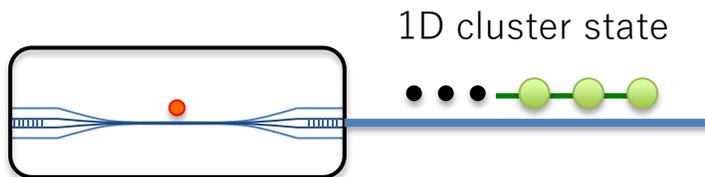


5年間の目標：

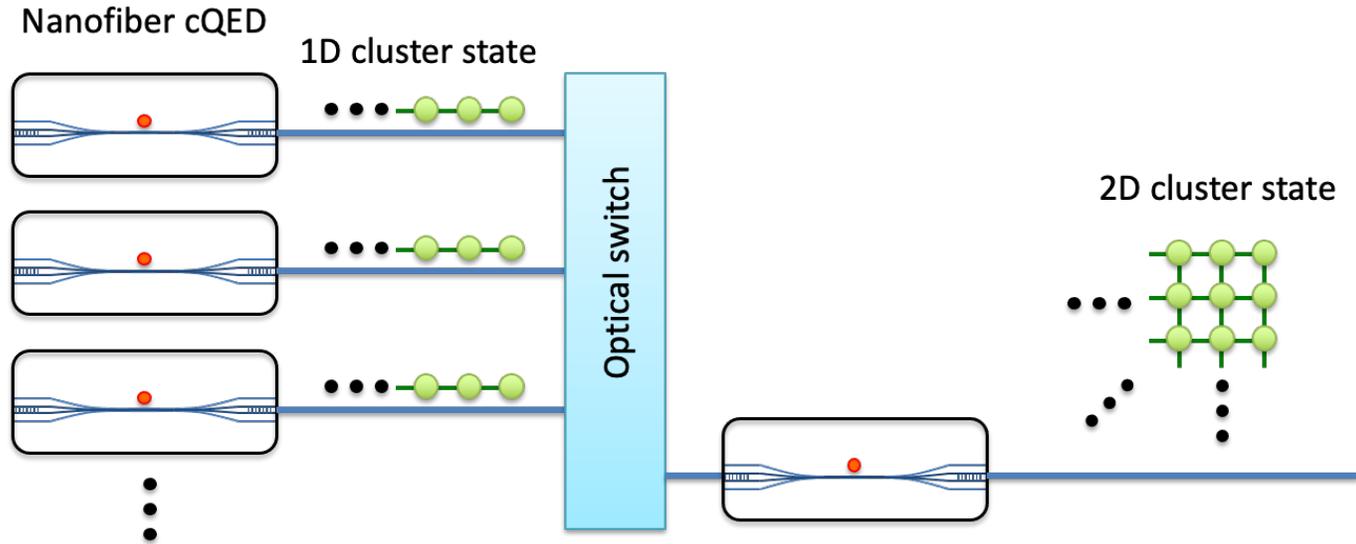
1次元クラスター状態生成技術の開発



ナノファイバー共振器と単一原子を使った共振器QEDによる光子量子ビット生成



10年間の目標：2次元クラスター状態生成技術の開発

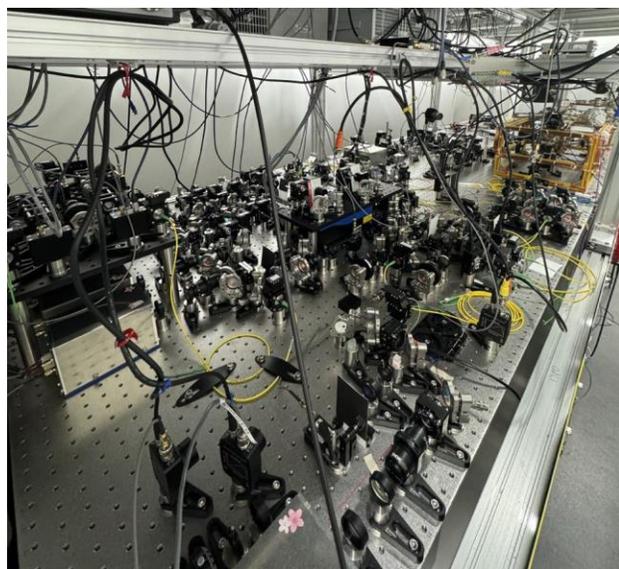
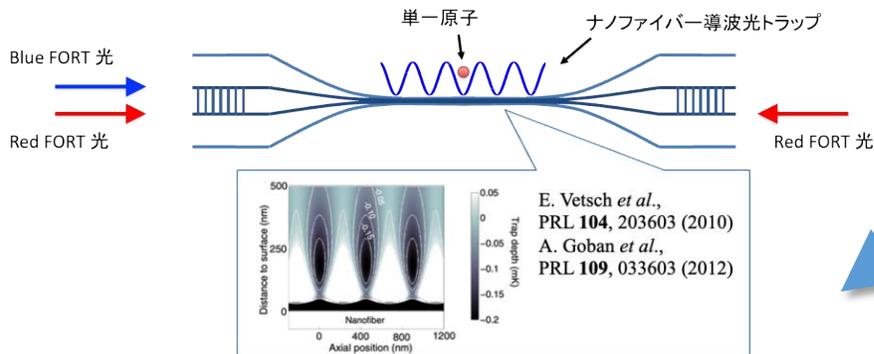


1次元クラスター状態生成にむけて



NICT-浜松ホトニクス
多重光子検出器

ナノファイバー共振器系

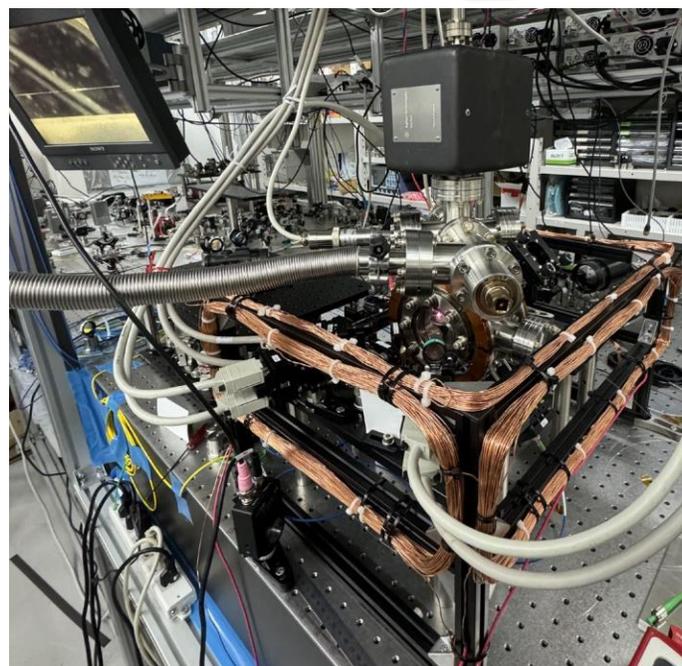
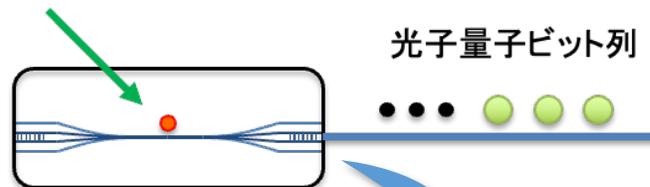


全体の光学システム

光子量子ビット列生成

コントロール光

光子量子ビット列



光子量子ビット列評価



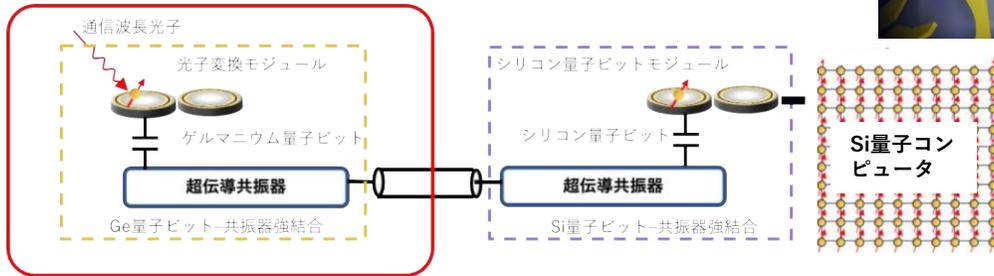
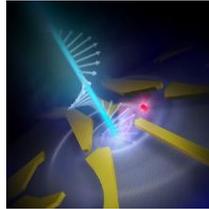
研究開発項目 3 : 半導体ネットワーク型技術

研究開発課題 1 : 半導体量子ビットの量子ネットワーク化技術
(大阪大学 大岩 顕 産業科学研究所・教授)

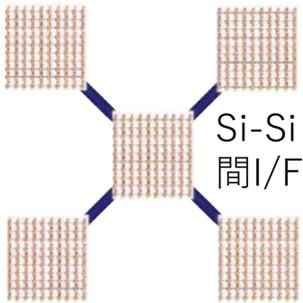


5年間の目標 : 半導体量子ドットの各種量子インターフェースを開発

- ① シリコン量子ビットと光子間量子インターフェース技術開発
(Si-Ge間I/F開発および光-Ge間I/F開発)



- ② シリコン量子ビット間の接続技術



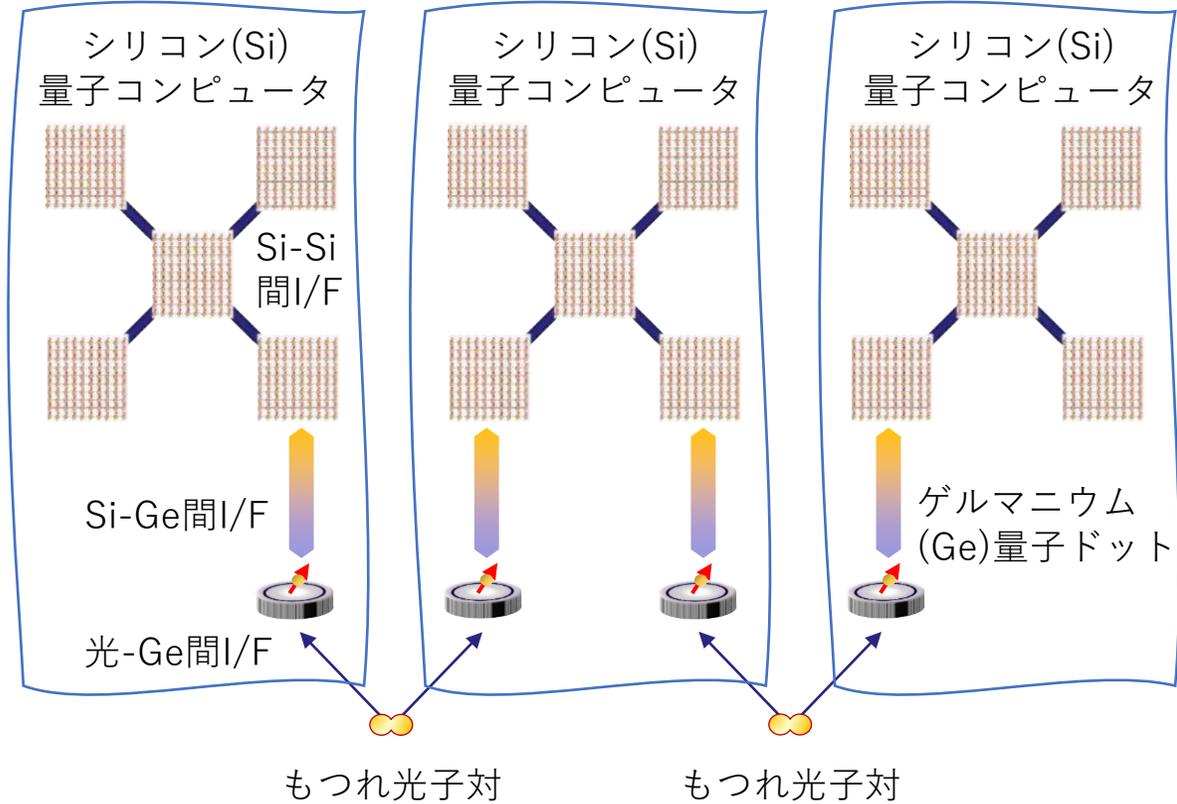
集積化のスケールに応じたSi量子ビット間接続法の開発

- ・断熱量子状態転写 (量子ドットアレイ)
- ・シャトル (量子ドットアレイ)
- ・超伝導共振器 (マイクロ波)

樽茶PJ、水野PJとの連携

- ③ 遠隔半導体量子ビット間の光接続

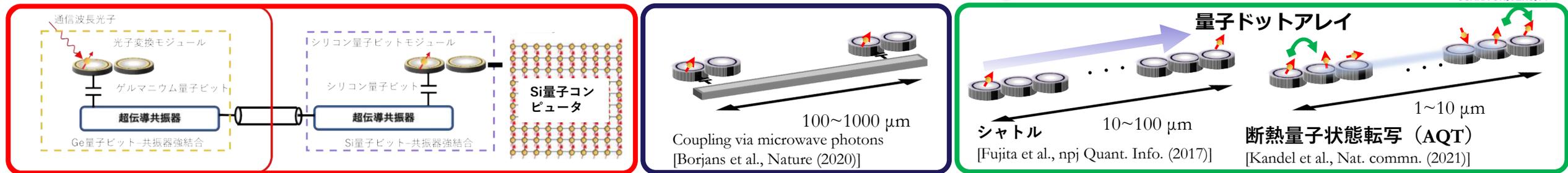
10年間の目標 : 半導体量子コンピュータのネットワーク接続



光-Ge量子ドット-超伝導共振器-Si量子ドット

Si量子ドット-超伝導共振器-Si量子ドット

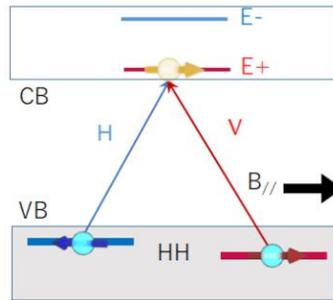
多重Si量子ドットアレイ



Ge量子ドット-光子I/F技術開発

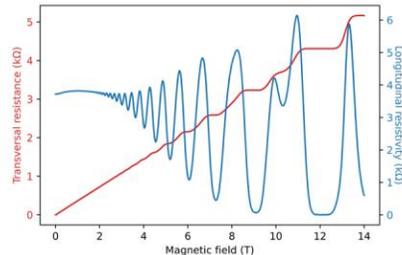
1. 量子状態変換遷移の定量的な研究 (小芦PM都倉グループと共同研究)

- 光子偏光から正孔スピンへの量子状態変換を提案 (Γ点でのλ型遷移)



2. Ge量子井戸の磁気輸送特性の評価

- Ge量子井戸の移動度や有効質量や散乱時間などを量子インターフェースの設計パラメータを評価
- 光照射下で安定動作する量子インターフェースの検討



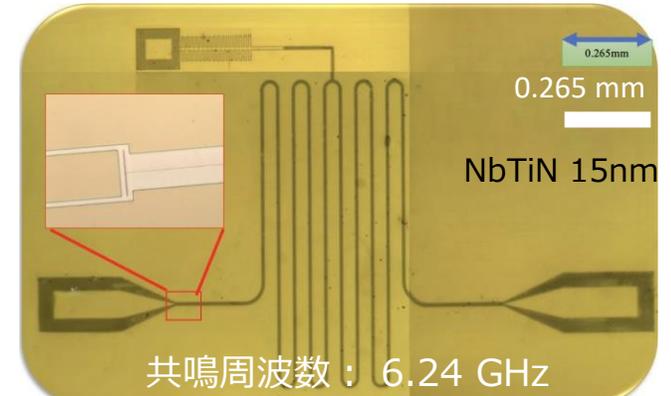
Ge量子ドットでの量子状態変換実証へ

Ge/Si量子ドットとSi量子ドットI/F技術開発

光子 (通信波長)

Ge量子ドット

超伝導共振器
(マイクロ波光子)



NbTiN薄膜: NICT三木Gから提供

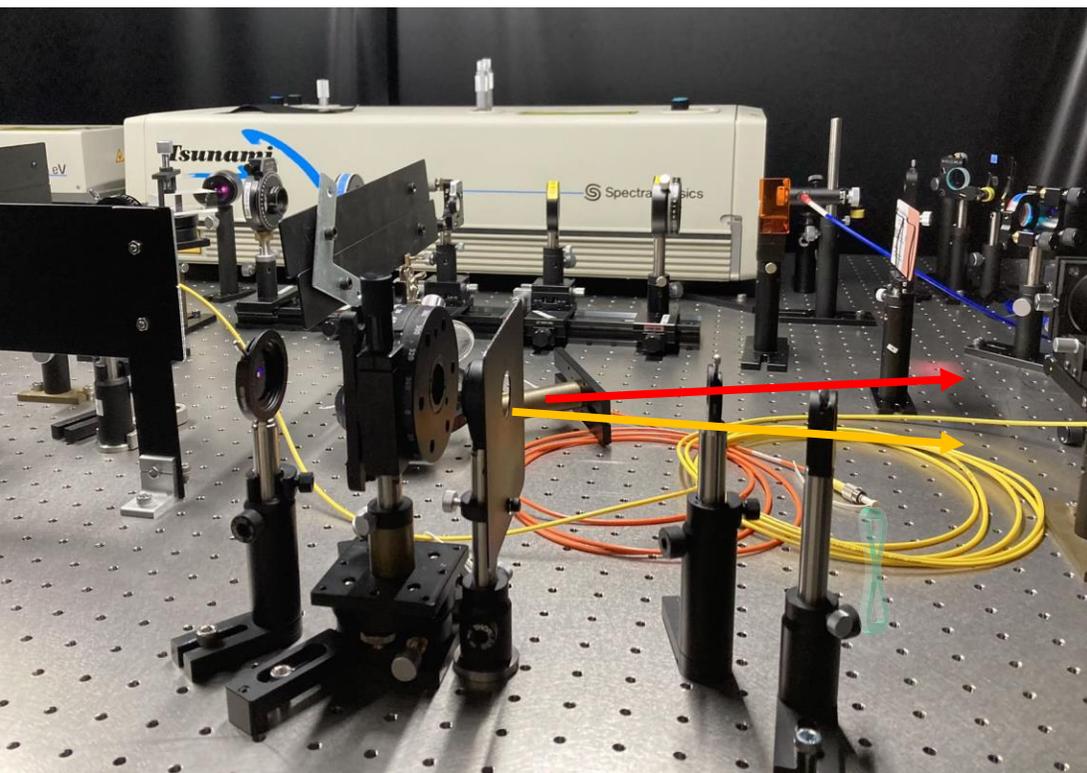
超伝導共振器の作製

低温・磁場下で評価中

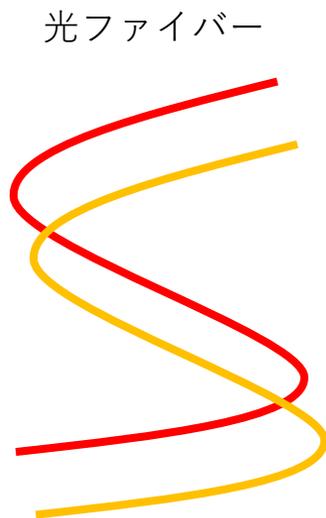
シャトルスピン共鳴を利用した強結合のために
シャトル用多重ドットとの複合構造を作製中

遠隔半導体量子ビット間の光接続

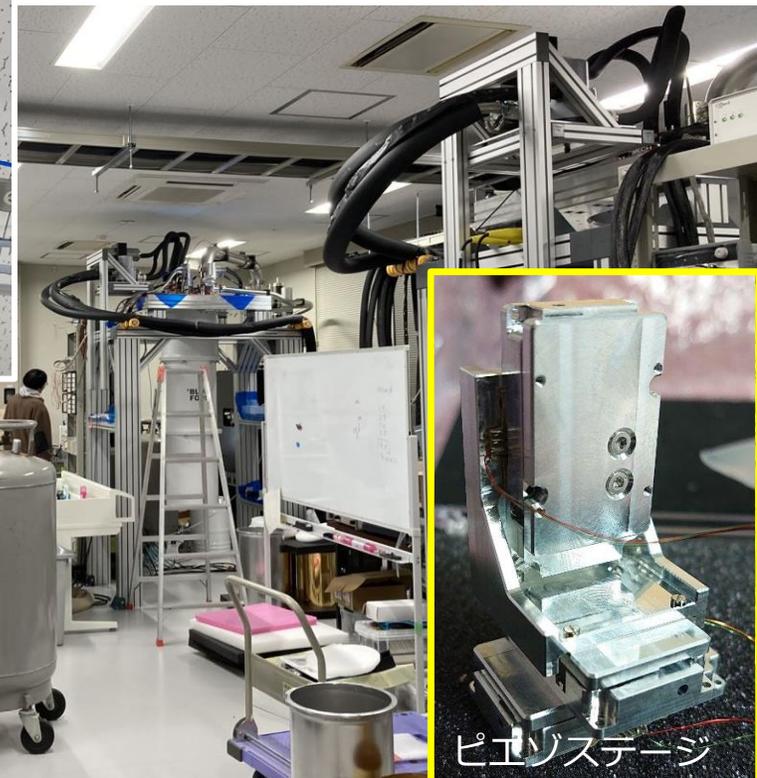
実験室間光ファイバ路



SPDCによる量子もつれ光子対源構築



量子もつれ光子対伝送のため
光学実験室間の光ファイバ路を設置



ピエゾ素子導入による低温光学系

離れた半導体量子ドット間に量子もつれを生成し、量子接続の実現へ

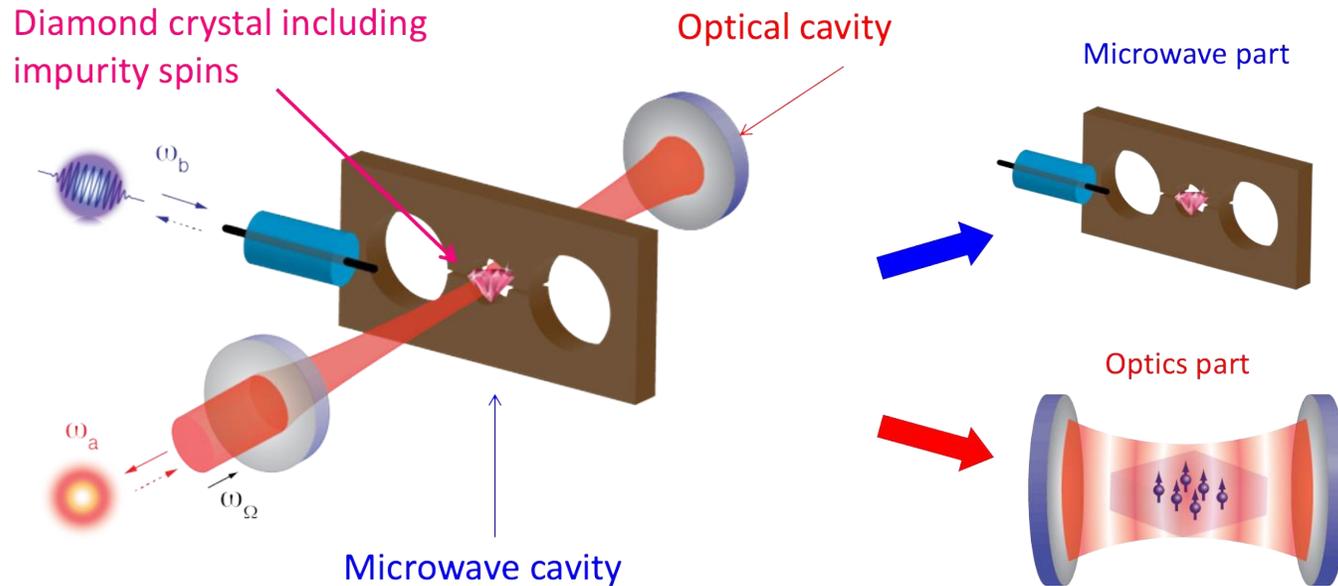
研究開発項目4：超伝導ネットワーク型技術

研究開発課題1：超伝導量子ビットの量子ネットワーク化技術
(OIST 久保結丸 Science and Technology Group・PI)



5年間の目標：

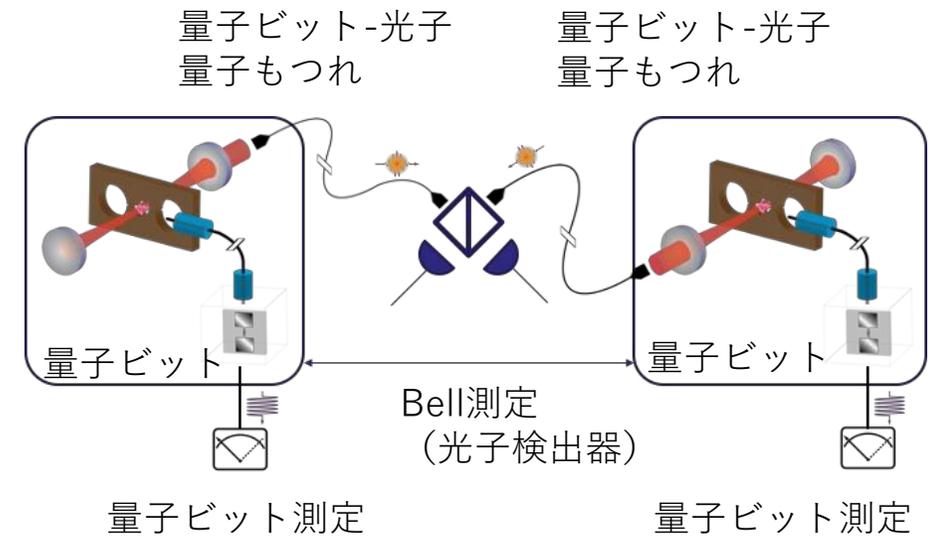
マイクロ波光子と通信光子の量子トランスデューサ開発



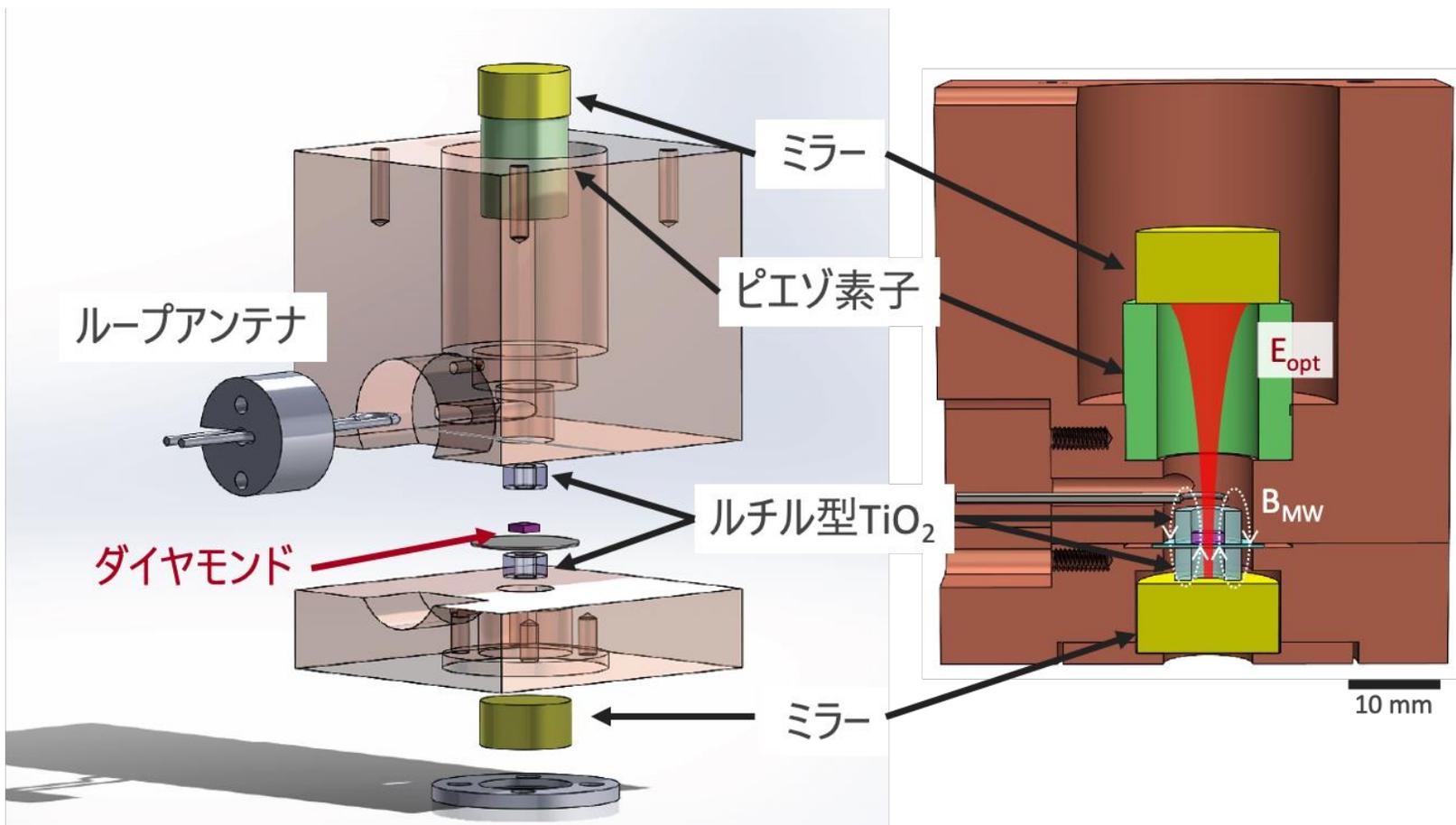
マイクロ波-光-ダイヤモンド複合共振器デバイスを開発し
量子トランスデューサの実現へ

10年間の目標：

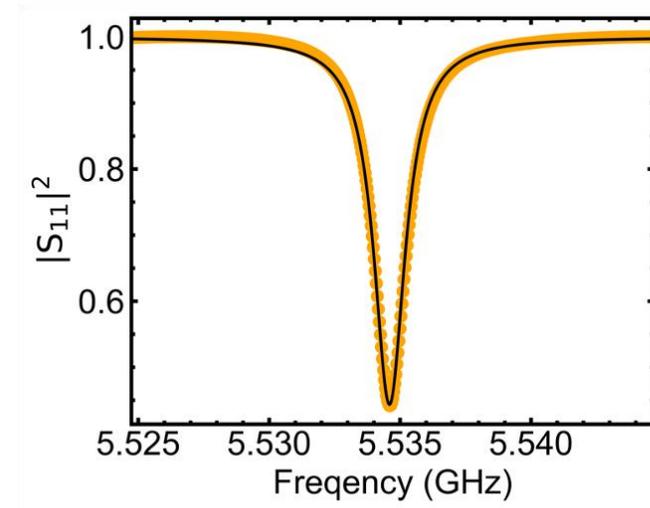
ネットワーク化された
超伝導量子コンピュータ開発



マイクロ波-光-ダイヤモンド複合共振器



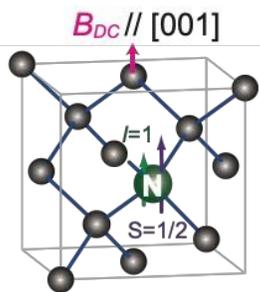
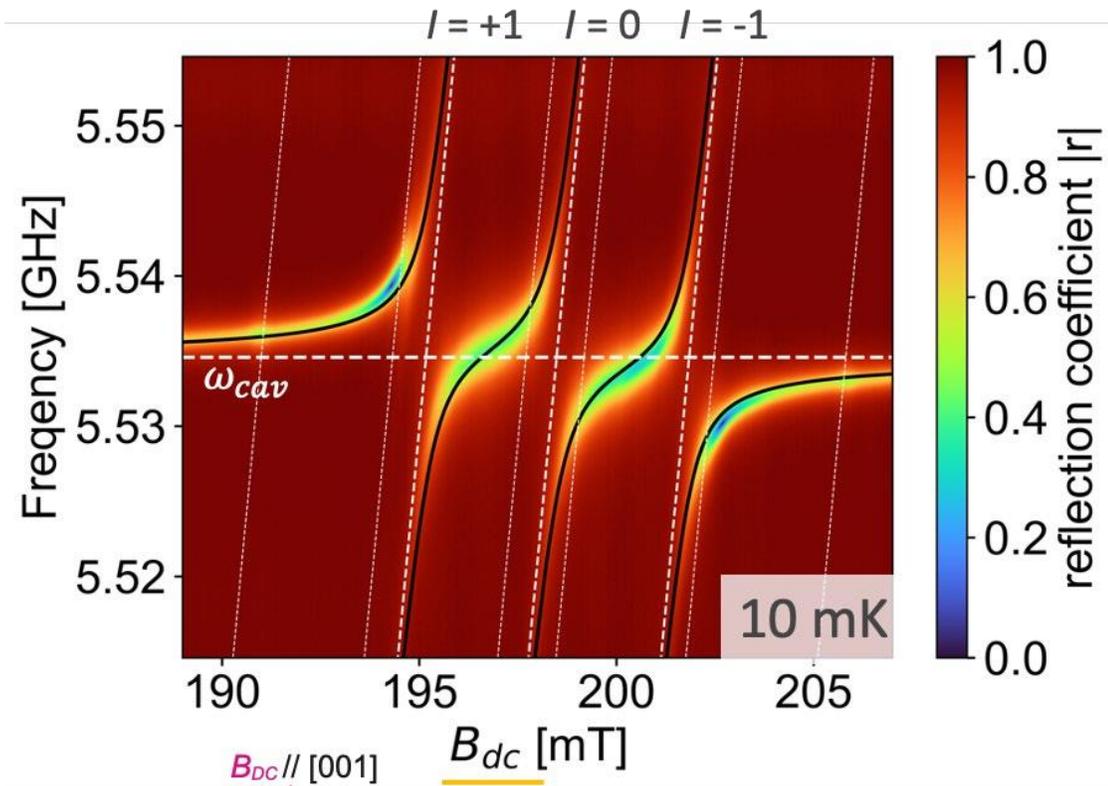
マイクロ波共振器性能



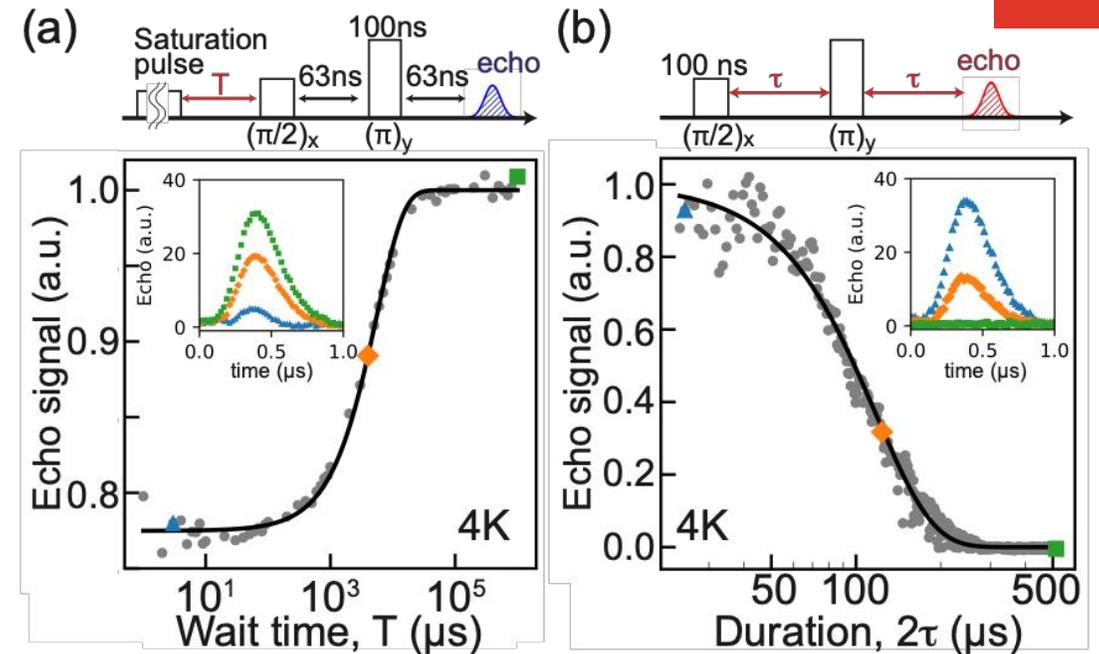
内部 $Q_{int} = 2 \times 10^4$ @ 10 mK
 (結合 $Q_{ext} = 3 \times 10^3$)
 理論上は 10^6 に到達可能

マイクロ波部分の動作確認

極低温における電子スピン共鳴マイクロ波分光

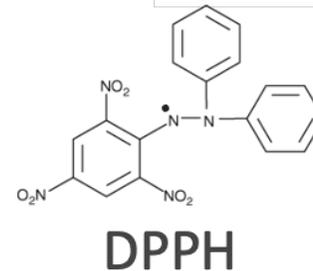


ダイヤモンドとの
強結合の達成



$T_1 = 5$ ms

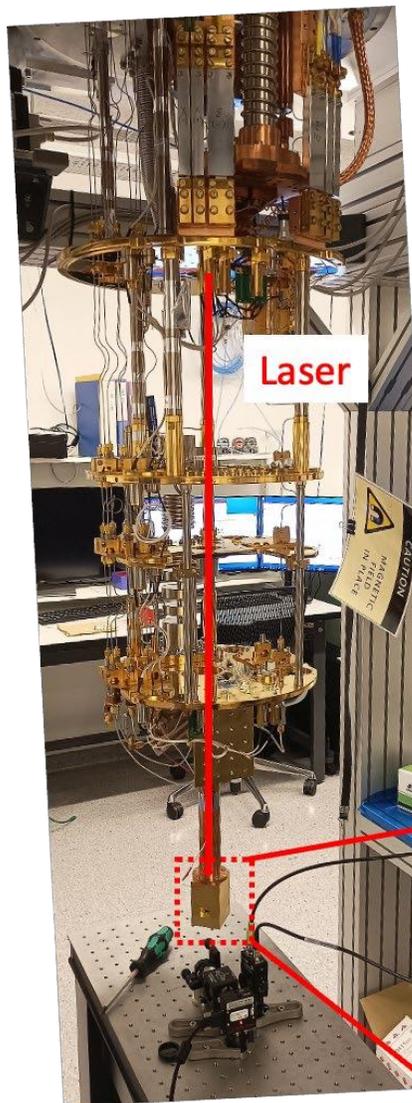
$T_2 = 234$ μs



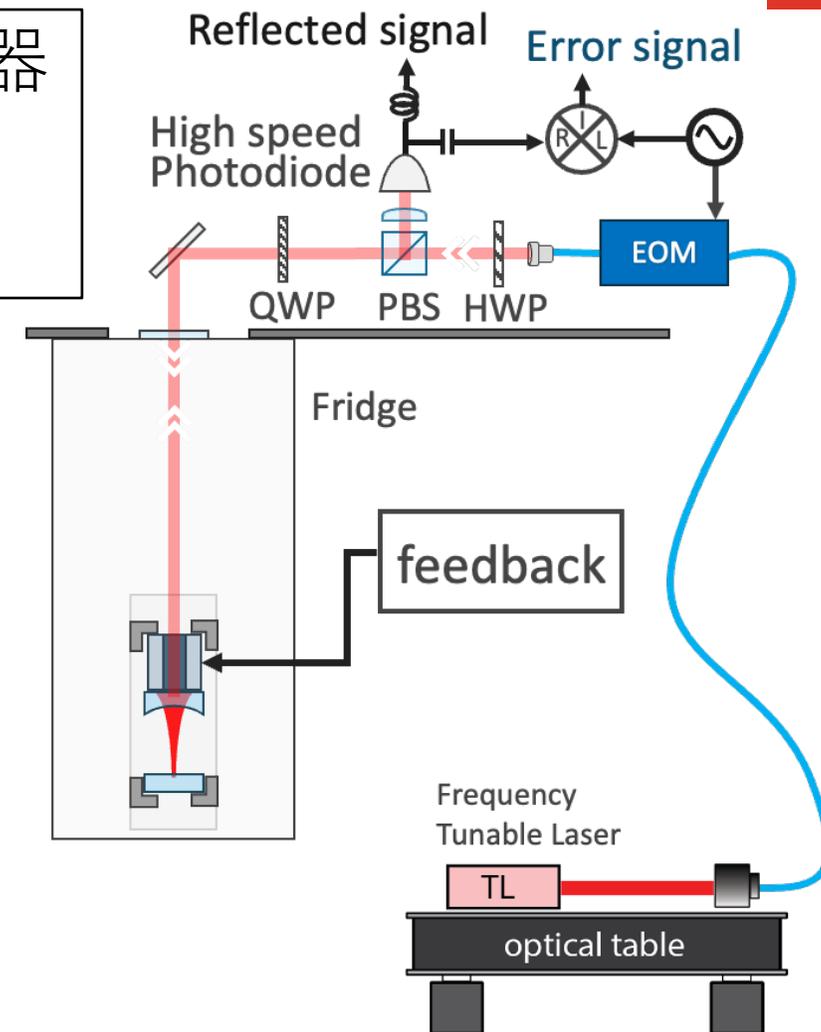
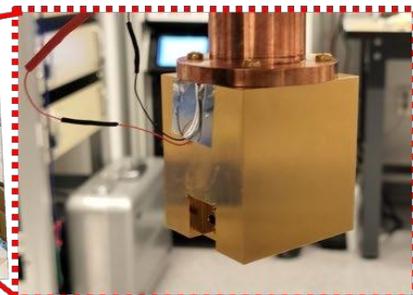
時間領域における
パルス測定の実証

光部分の動作確認

光共振器の極低温動作



- 希釈冷凍機内で光共振器の安定動作実証
- フィネス300達成



国際ワークショップ 量子情報技術スプリングスクール

1st International Workshop on Quantum Information Engineering (QIE2023)開催

2023年10月11日ー13日

沖縄科学技術大学

シーサイドハウス

67名参加

海外招待講演者

ボゾニック誤り訂正 M. Hays (MIT)

スピン量子ビット R. Li (imec)

など

ムーンショット招待講演者

山本剛 (PM)、越野和樹、

小寺哲夫など

オーガナイザー (MS関係者)

大岩顕、小坂英男、山本俊、

岩本敏、根本香絵、齊藤志郎、

久保結丸、山下真など



若手講師陣 (20名) の講義 (参加者40名程度)
企業研究現場の見学 (NTT横須賀研究開発センタ)



学生ネットワーク・研究強化に！

2024年度も国際ワークショップおよび量子情報技術スクール開催予定