

ムーンショット目標6 公開シンポジウム2022
2022/3/11 15:25-15:45



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

量子情報・量子生命研究センター(QIQB)

大学院基礎工学研究科

山本俊

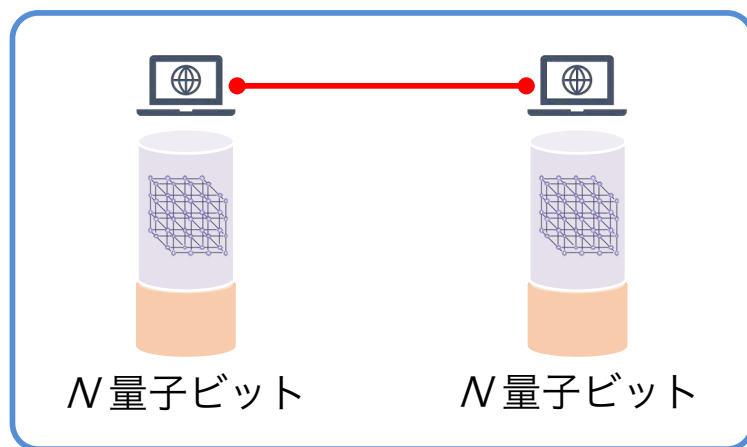
ビジョン

誤り耐性汎用型量子コンピュータにむけた課題

- 100万から1億量子ビット以上必要
- 物理的制約で単一システムでの実現が困難

➡ 量子コンピュータをネットワーク接続

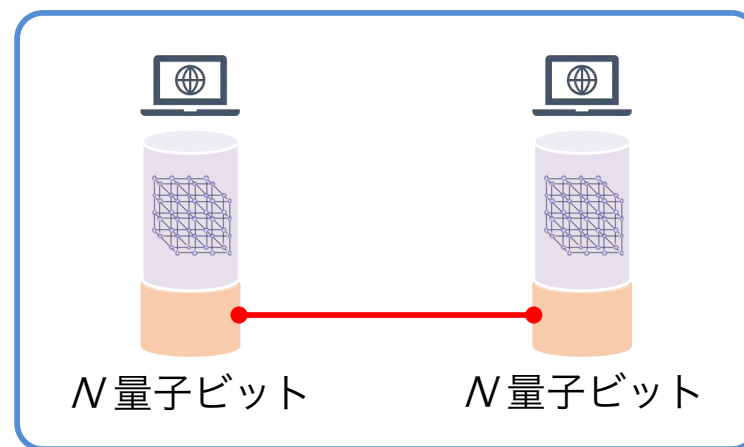
現在のネットワークで接続



せいぜい N 量子ビット

量子コンピュータとしての
大規模化には寄与しない

量子ビットレイヤーで接続



$2N$ 量子ビット

量子コンピュータとして
大規模化

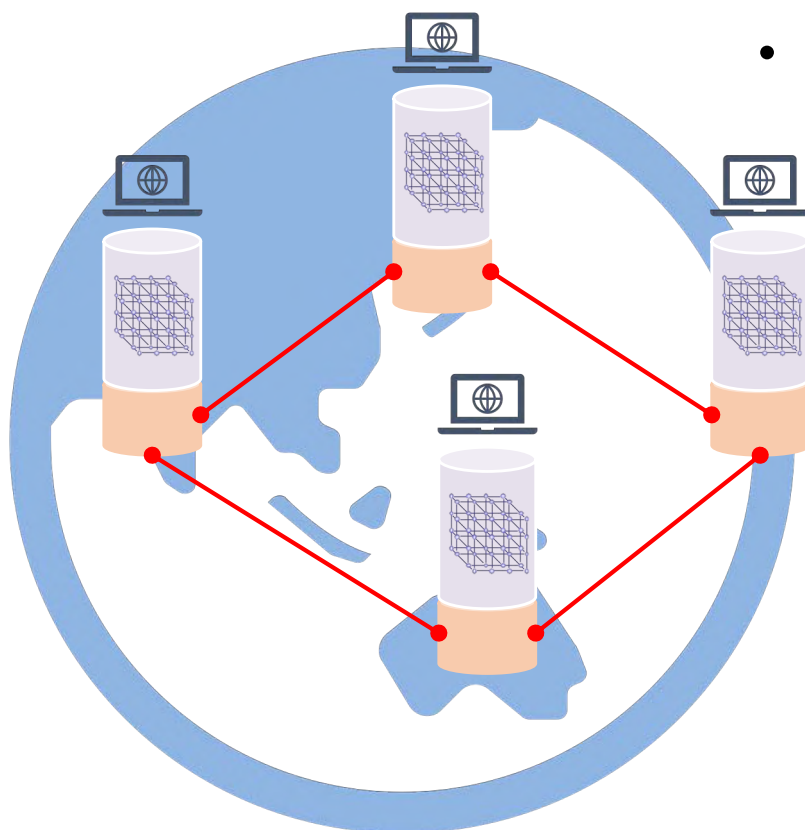
➡ ネットワーク型量子コンピュータ

ビジョン

量子コンピュータ時代における課題

- 通信セキュリティへの不安
- 量子計算結果の漏洩

➡ 分散化されたネットワーク型量子コンピュータ＝量子インターネット



- ・ オール量子通信によるセキュリティ通信
- ・ 秘匿量子計算

さらに

- ・ 量子センサーネットワーク
などの応用可能性



あらゆる量子プロトコルを実装する
現在のサイバースペースの量子版



量子サイバースペース

研究課題

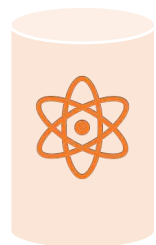
様々な量子コンピュータを接続する手法をオールインクルーシブに研究

原子/イオン



研究開発項目 1 :
原子ネットワーク型技術

阪大基礎工
山本俊



研究開発項目 1-2,3 :
超伝導光子検出器開発

浜松ホトニクス(HPK)
下井英樹、小玉剛史
NICT
三木茂人

光



研究開発項目 2 :
光子ネットワーク型技術

早稲田大理工
青木隆朗

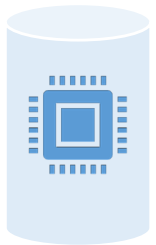


半導体



研究開発項目 3 :
半導体ネットワーク型技術

阪大産研
大岩顕

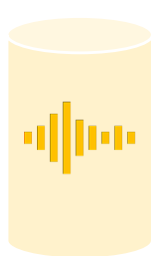


超伝導



研究開発項目 4 :
超伝導ネットワーク型技術

OIST
久保結丸



連携

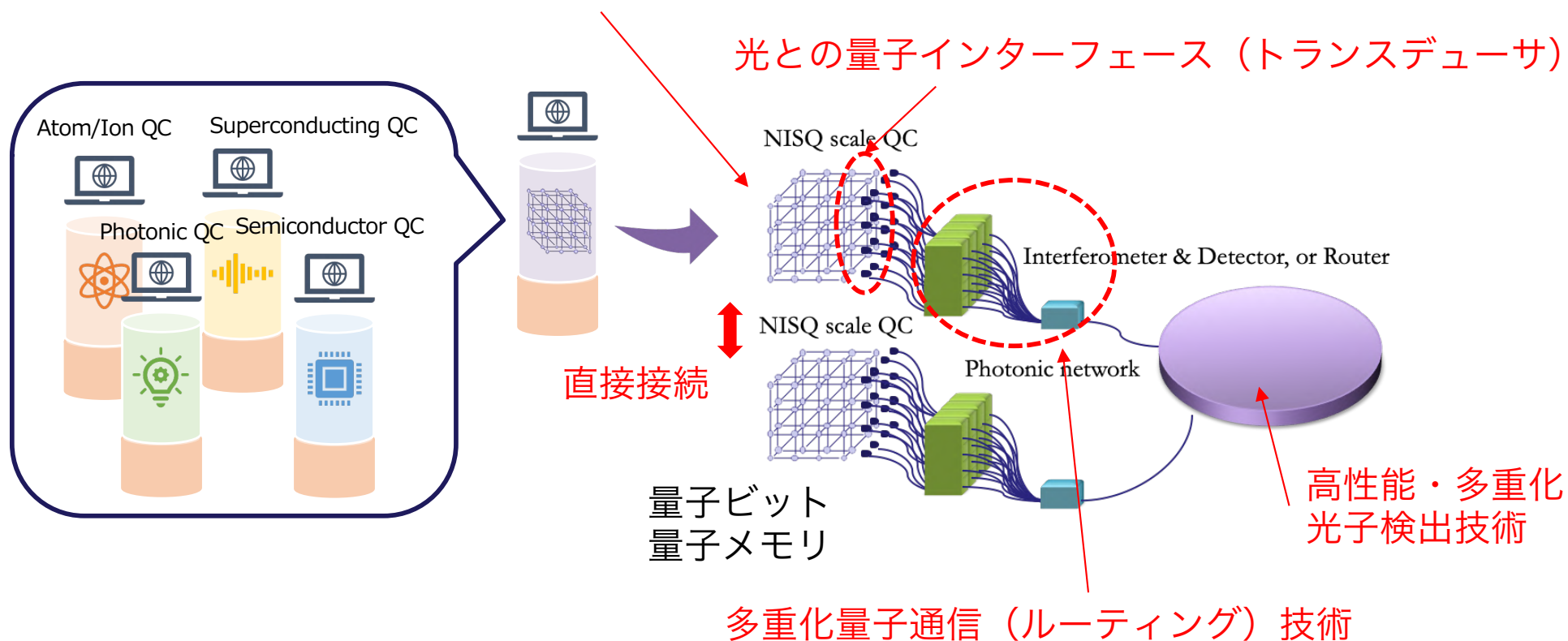


目標6内ハードウェア
外部プロジェクト
理論・ソフトウェア

プロジェクトの概要

量子コンピュータハードウェアの想定される候補の接続
—超伝導、光、原子・イオン、半導体—

様々なハードウェアによる量子コンピュータ

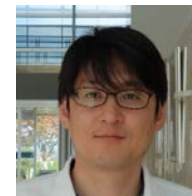


高性能・多重化光子検出器

超伝導ナノワイヤ単一光子検出器 (SNSPD) :

高検出効率、広帯域、低暗計数率、低タイミングジッタが実現可能

＊少数光子数であれば、光子数識別が可能

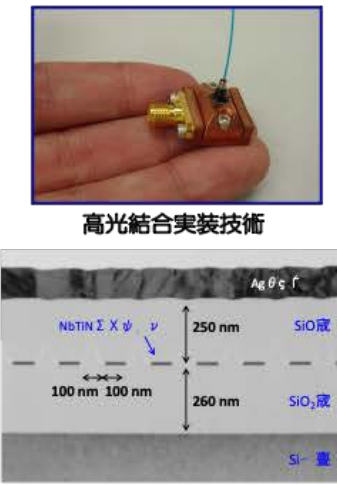


項目1-課題3 : NICT 三木茂人 主任研究員

高性能SNSPDシステム開発



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]

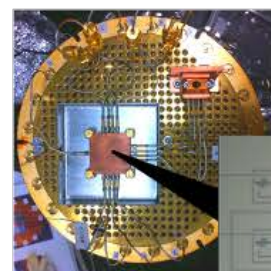
SNSPD応用



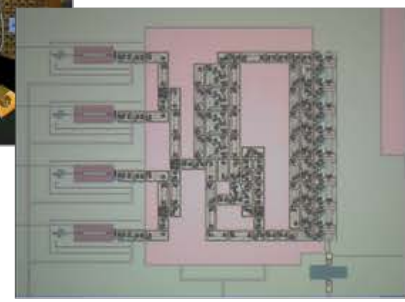
東京QKDネットワークデモ

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

SNSPD高機能化



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)

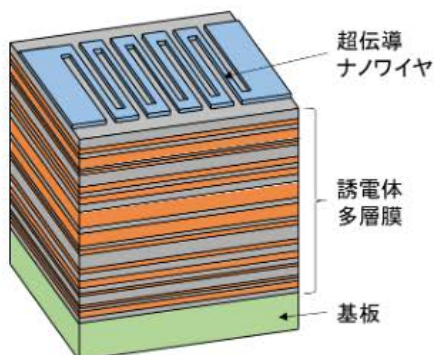
➡ 10年後目標 : ①検出効率 99 %、②数百チャンネル集積化技術

高性能化に関して

SNSPD性能・仕様

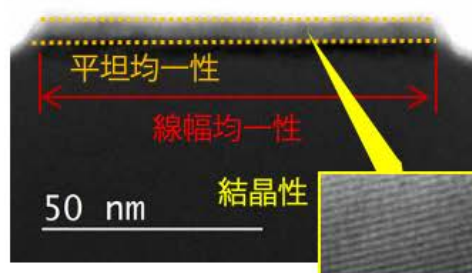
	対応波長 (nm)	検出効率 (%)	暗計数率 (カウント/秒)
現状性能	780、1550	～80%	～10
MS目標(5年)	310、710、780、850、1550	95%	0.1

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



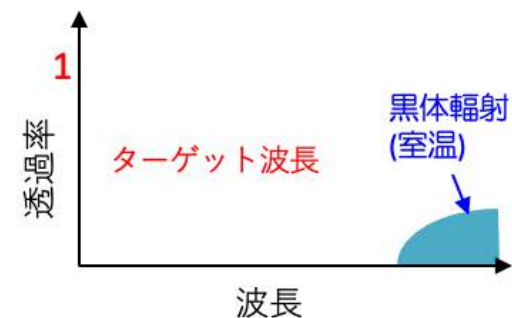
検出効率を決定づける各要素の最適化を実施する

- ・ 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

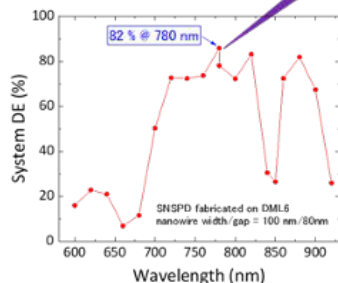
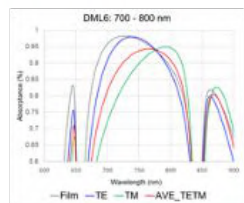


黒体輻射などの背景光を排除することが可能な技術開発を実施

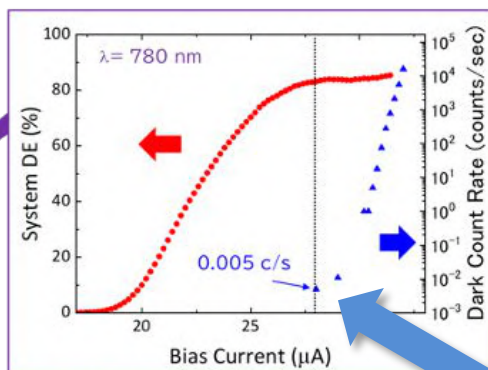
- ・ 光学多層膜フィルタ
- ・ ファイバブラッググレーティング(FBG)



高性能化に関して

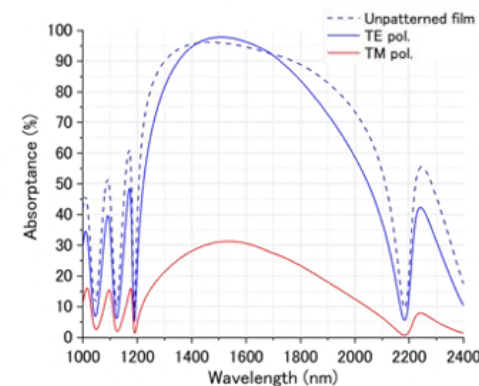
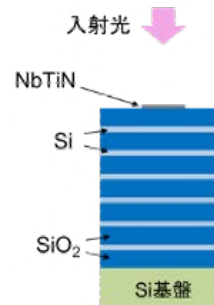


システム検出効率の波長依存性

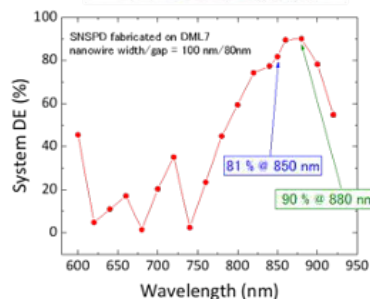
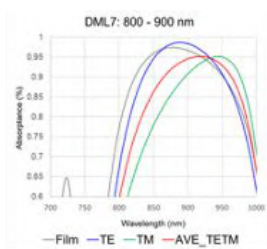


システム検出効率・暗計数率のバイアス電流依存性

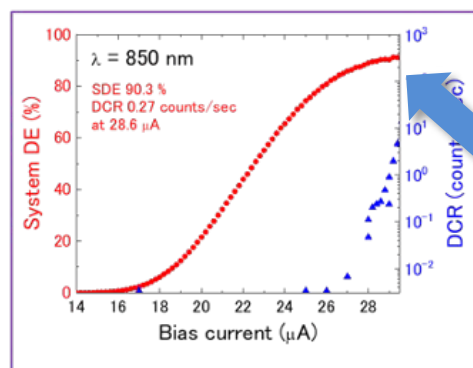
780nm用SNSPD素子



暗計数率0.005 c/s

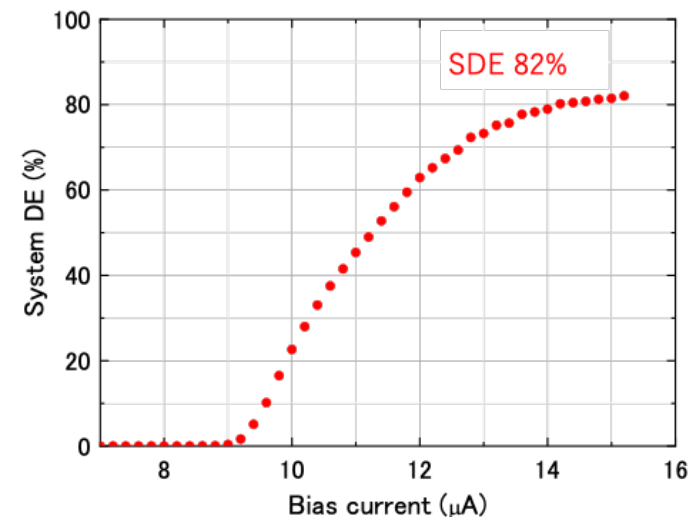


システム検出効率の波長依存性



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



1550nm用SNSPD素子

検出効率
90.3 %

多重化光子検出器について

項目1-課題2：浜松ホトニクス(HPK) 下井英樹、小玉剛史



目標：高性能SNSPDシステムの開発

Parameter	目標値	現状
Mile Stone (SSPD sys.)	780, 1550 nm Total 100 ch	1550 nm, 6ch
Wavelength	780 nm, 1550 nm	1550 nm
D.E.	Typ. 90 %	Typ. 80 %
Jitter	50 ps	70 ps
Channel	50 ch / wavelength	6 ch
連続動作	> 6 month	2 month

※ SNSPDは研究開発課題3(NICT)のSNSPDを実装予定



各研究開発項目への提供

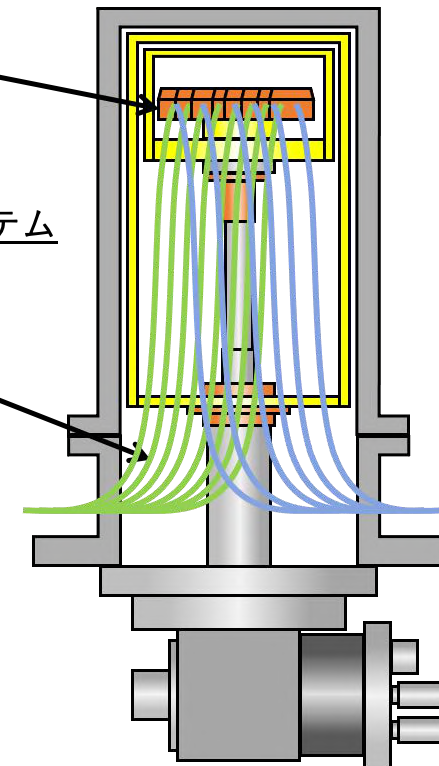
SNSPDの製造開発

- 内製化
- 成膜技術確立
- 特性向上
- NICTと協力

多チャンネル冷凍システム

- 熱流入低減
- 信号評価
- SNSPD設置
- 低暗計数率
- 高真空気密

SNSPD冷凍システム
断面模式図



➡ 5年後：30 ch規模のシステム製造、トータル100 ch超の多重化

多重化光子検出器について

項目1-課題2：浜松ホトニクス(HPK) 下井英樹、小玉剛史

開発状況 1 | SNSPD製造技術開発

導入装置	超伝導スパッタ装置	ボンディング装置	マスクレス露光装置	スピコート	有機局排装置
外観など					
狙い・特徴	• NICT装置ベース • SNSPD高感度化 • 6インチ対応	• SNSPDパッケージとの導通 • 電気特性評価	• 最小描画サイズ 1 μm • SNSPDの電極パターン形成 • マスク不要による開発の時短	• レジスト塗布によるフォトリソの導入 • 6インチ対応	• フォトリソに伴う有機溶剤に対応した安全性の確保

超伝導薄膜蒸着～パッケージング化まで一連の製造装置を導入

SNSPDの開発環境を整備
(電子ビーム露光はNICT様と協力)

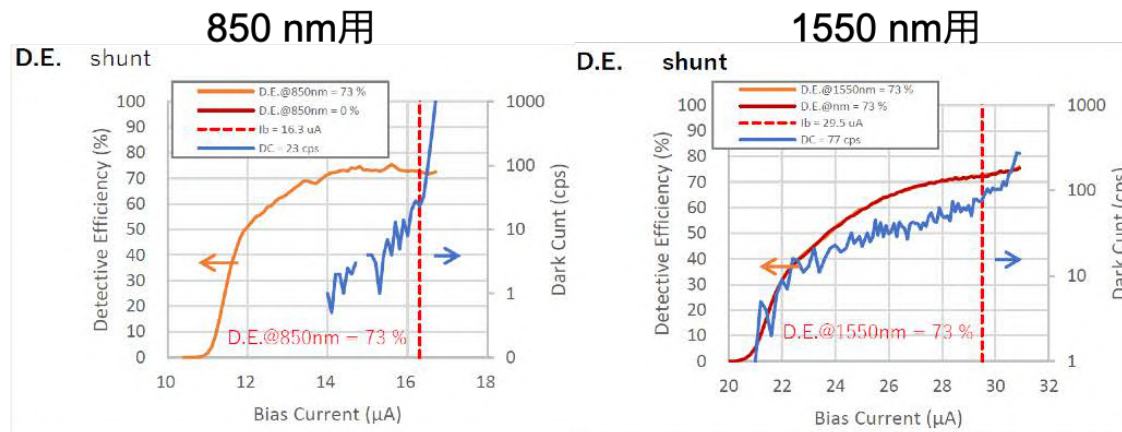
多重化光子検出器について

項目1-課題2：浜松ホトニクス(HPK) 下井英樹、小玉剛史

開発状況3 | 各研究課題へSNSPDシステムの提供

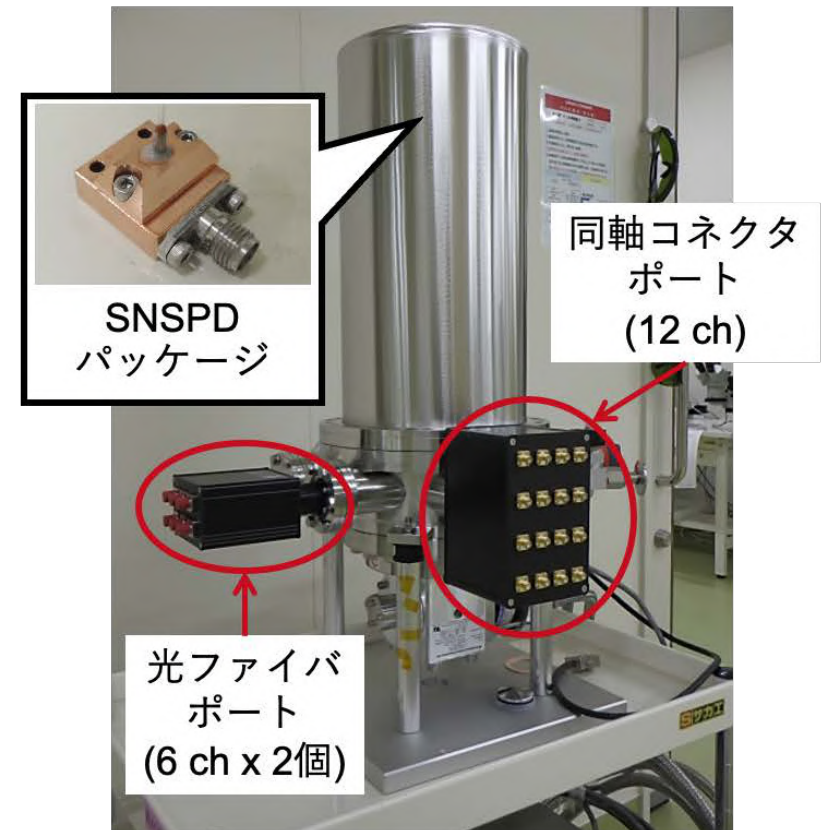
提供先	感度波長	搭載SNSPD数
早稲田大学 青木先生	850 nm, 1550 nm	6 個@850 nm 6 個@1550 nm
OIST 高橋PM	850 nm	6個@850 nm

SSPD検出効率特性 (NICT 三木氏作製)



検出効率の選定を進め、各研究課題と調整して提供

12ch SNSPDシステム

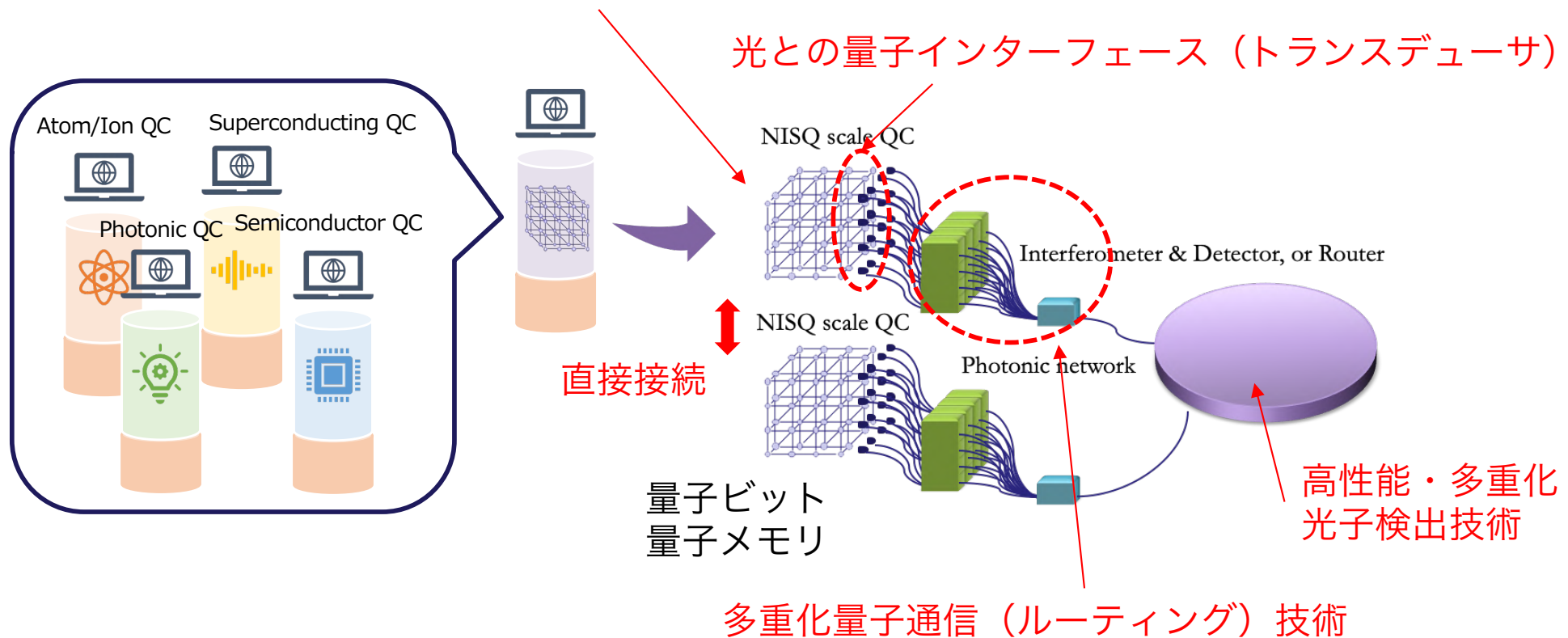


世界トップレベルのch数の実装
30chへの拡張性あり

プロジェクト概要

量子コンピュータハードウェアの想定される候補の接続
—超伝導、光、原子・イオン、半導体—

様々なハードウェアによる量子コンピュータ

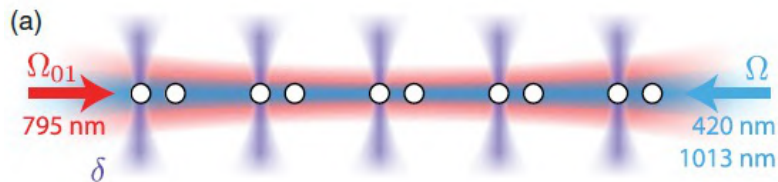


研究開発項目 1：原子ネットワーク型技術

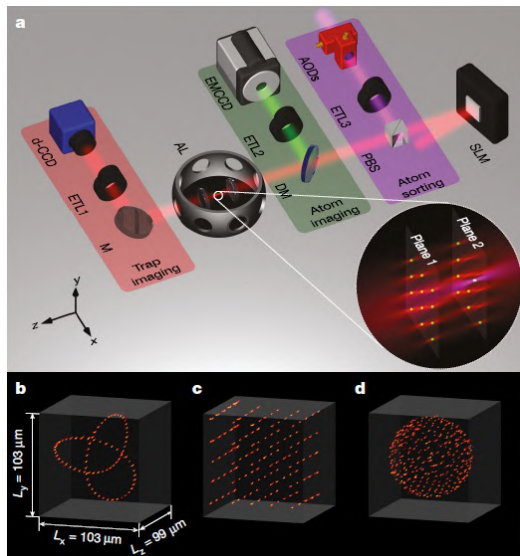
研究開発課題 1：原子・光多重化量子ネットワーク技術
(大阪大学 山本俊 基礎工学研究科・教授)



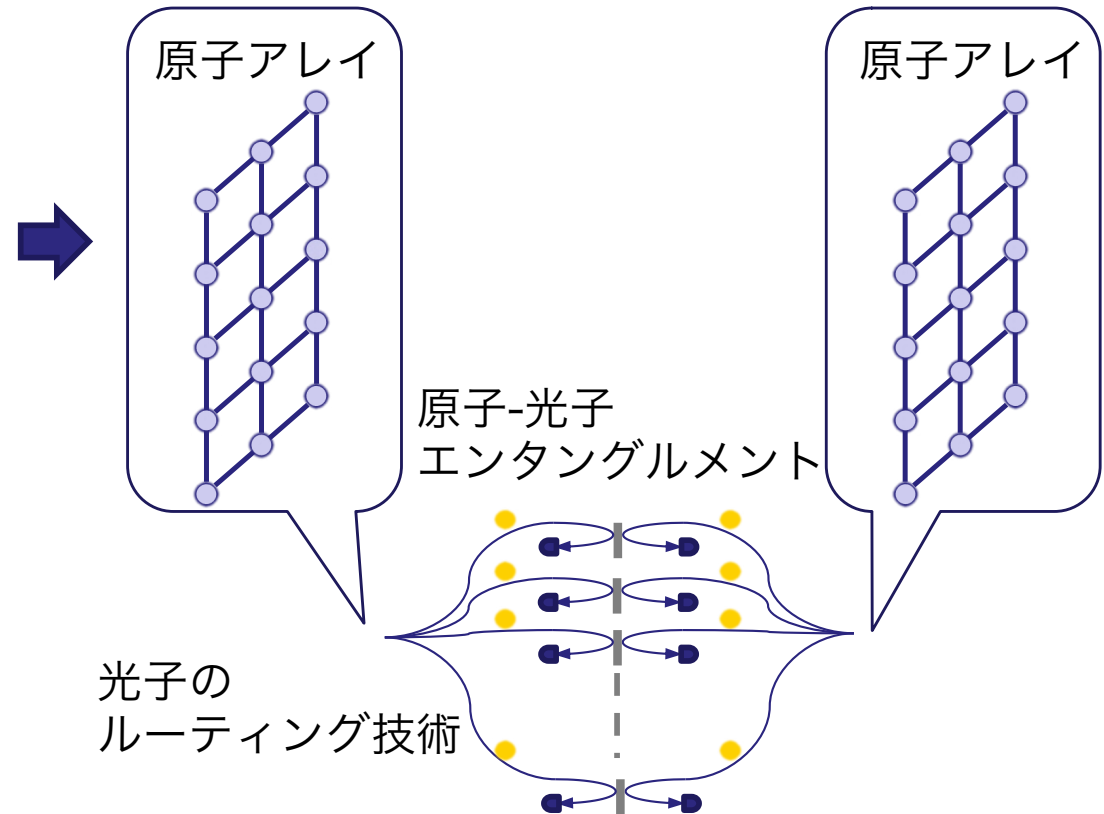
原子アレイ量子コンピュータ



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)



3D 72原子の配列
Paris-Saclay University
(Nature 561, 79 2018)

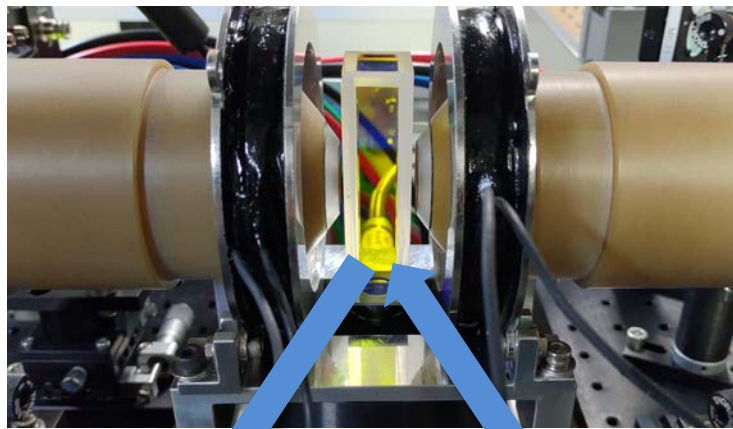


5年間の目標：原子光子エンタングルメントを生成し、原子アレイを接続する

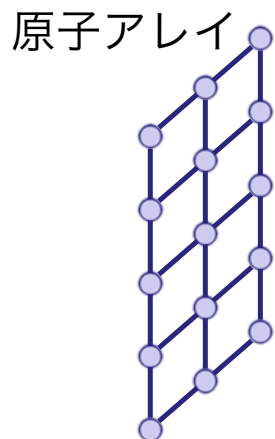
研究開発項目 1：原子ネットワーク型技術

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-光子エンタングルメント生成の準備状況
- 光子ルーティングの要素技術開発



準備中

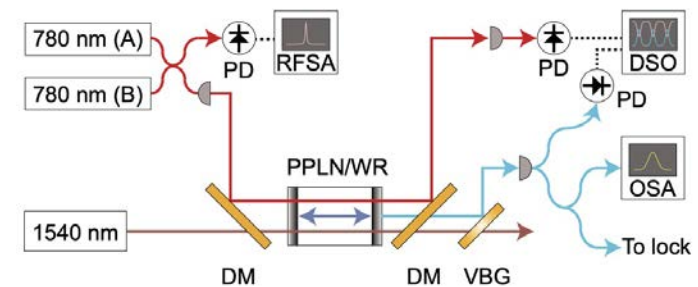
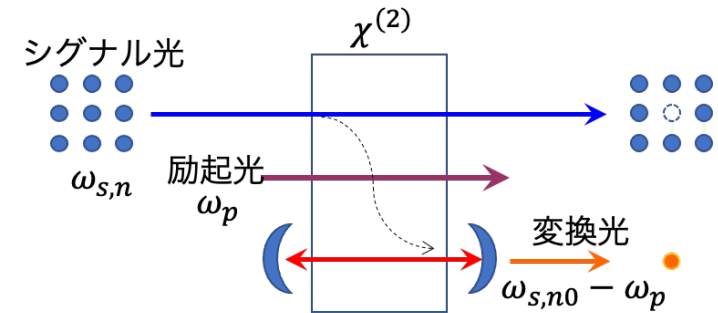


トラップビームアレイ



テストパターン 間隔：~100um

Optical frequency tweezers
の提案および実証



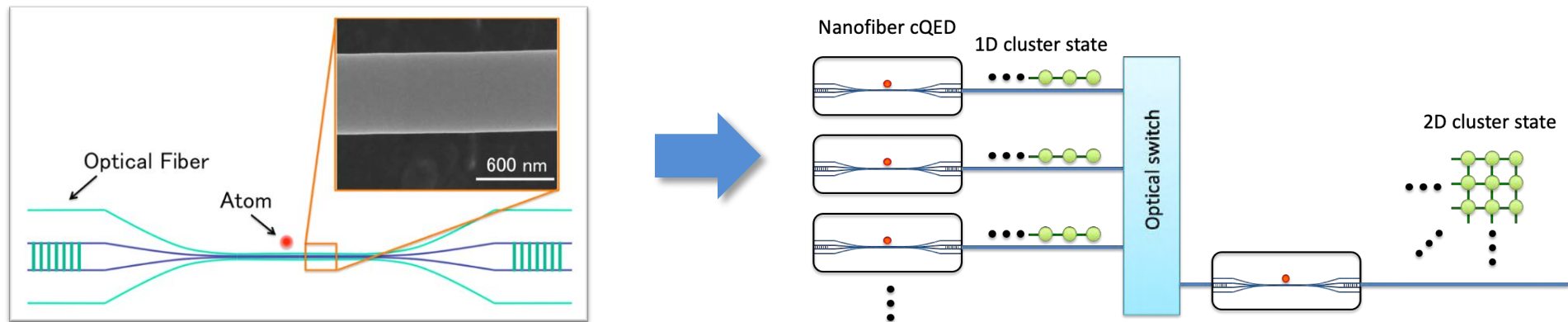
R. Ikuta, M. Yokota, T. Kobayashi, N. Imoto, T. Yamamoto,
"Optical Frequency Tweezers," Physical Review Applied,
17,034012 (2022).

研究開発項目2：光子ネットワーク型技術

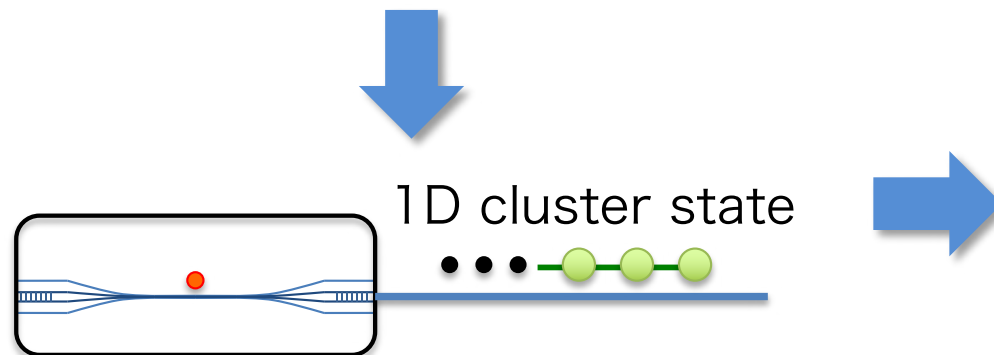
研究開発課題1：共振器QED量子ネットワーク化技術
(早稲田大学 青木隆朗 理工学院・教授)



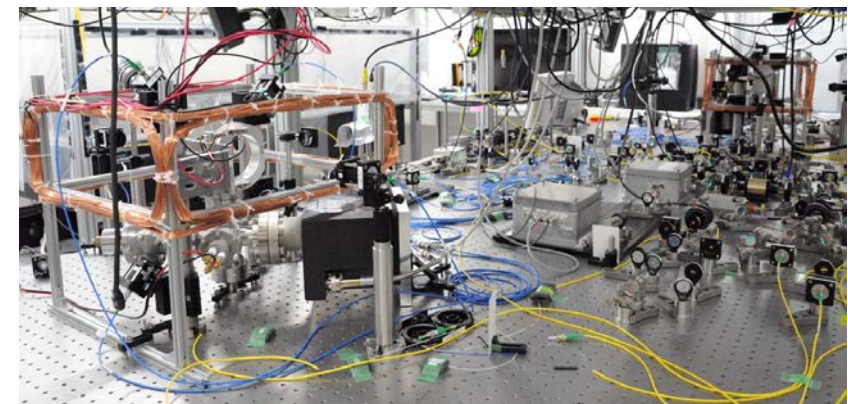
10年目：2次元クラスター状態生成技術の開発



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



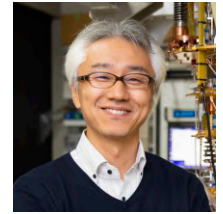
5年目：1次元クラスター状態生成



検討、設計が終わり準備中

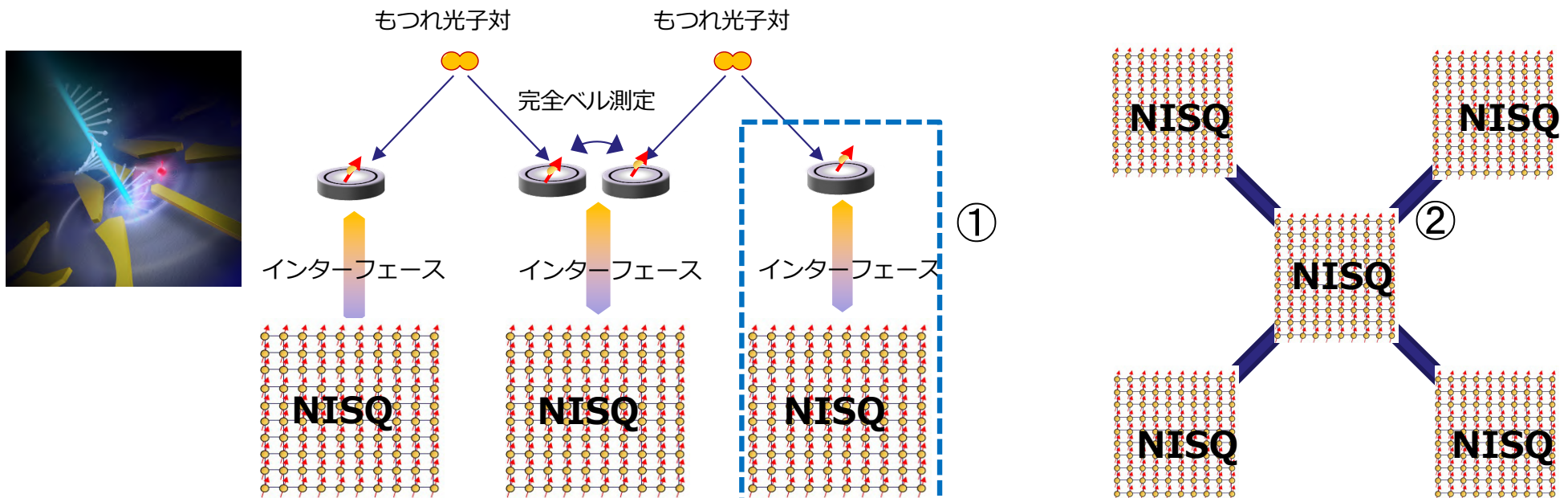
研究開発項目 3：半導体ネットワーク型技術

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)



半導体量子ビットをベースとした量子インターフェースを開発

- ① 光子とシリコン量子ビット量子インターフェース技術の開発 (Ge量子ドット)
- ② NISQ間接続のためのシリコン量子ビット間の接続技術

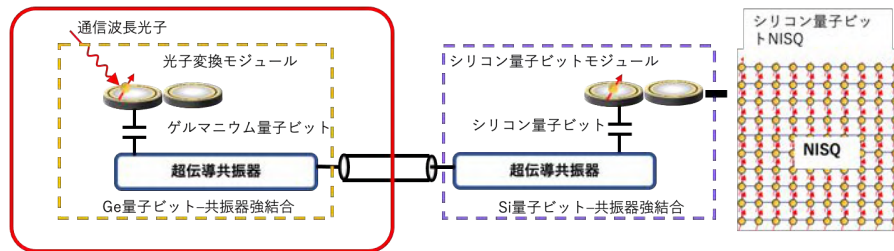


10年目：NISQ規模の半導体量子ビットのネットワーク接続

研究開発項目 3：半導体ネットワーク型技術

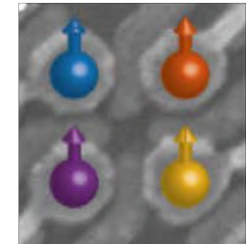
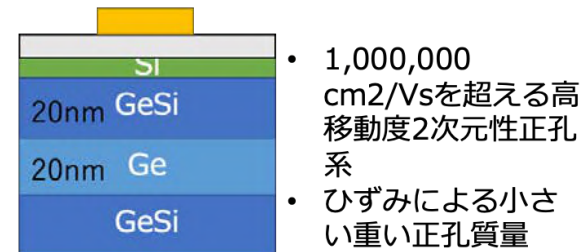
研究開発課題 1：半導体量子ビットの量子ネットワーク化技術
(大阪大学 大岩顕 産業科学研究所・教授)

① Ge量子ドットを利用した量子インターフェース



Ge量子ドット作成中

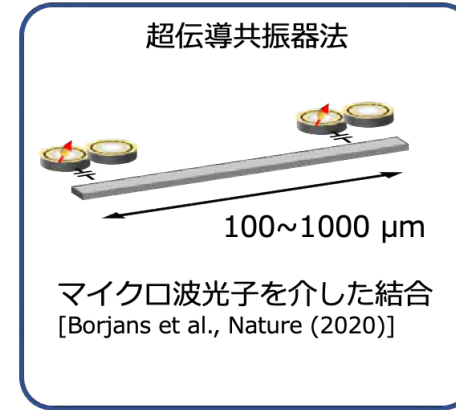
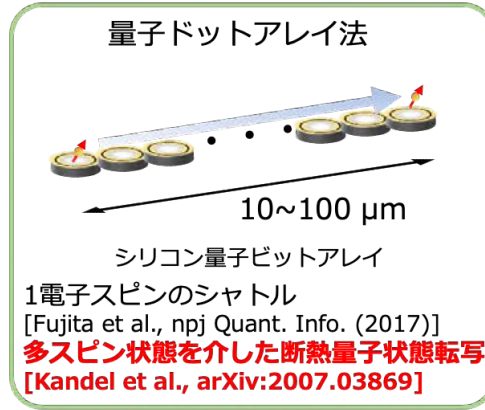
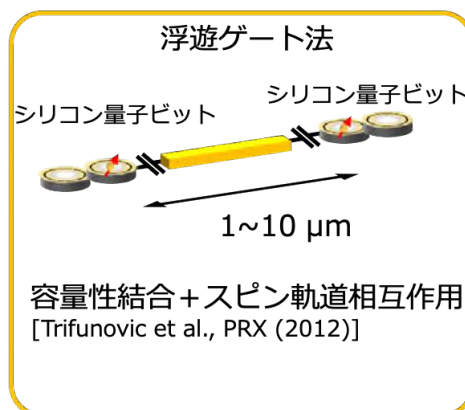
アンドープGe量子井戸 (Delft工科大学、東京都市大学)



Nature 2021

② NISQ間接続のための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NISQ間接続法の開発

検討する複数の量子ビット間結合法



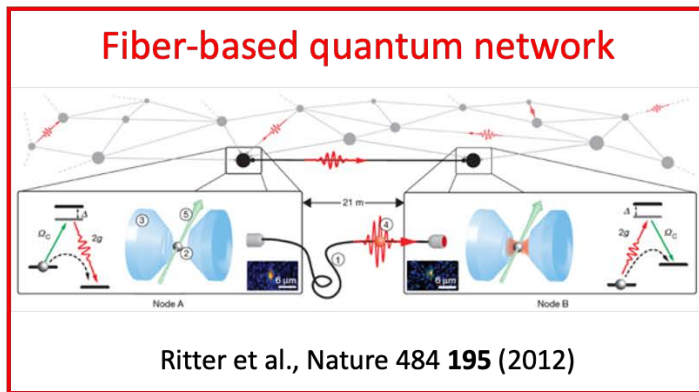
量子ドットアレイ法
を検討中

研究開発項目 4：超伝導ネットワーク型技術

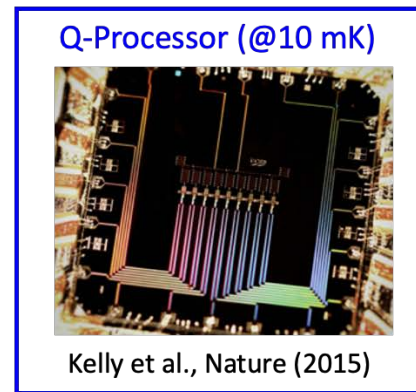
研究開発課題 1：超伝導量子ビットの量子ネットワーク化技術
(OIST 久保結丸 Science and Technology Group・PI)



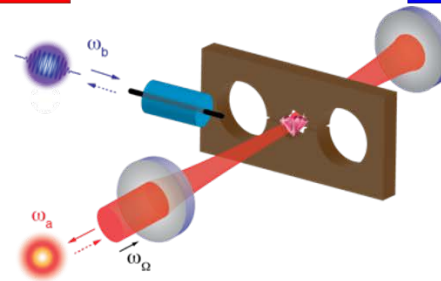
Optical photons ($\sim \text{eV} \gg 300 \text{ K}$)



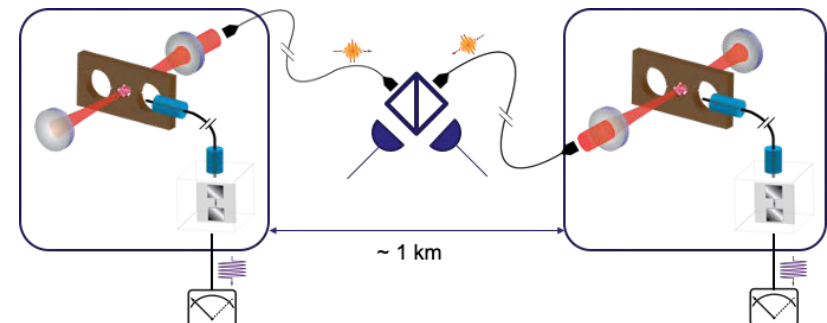
Microwave photons



Need a **quantum microwave-optical** transducer!

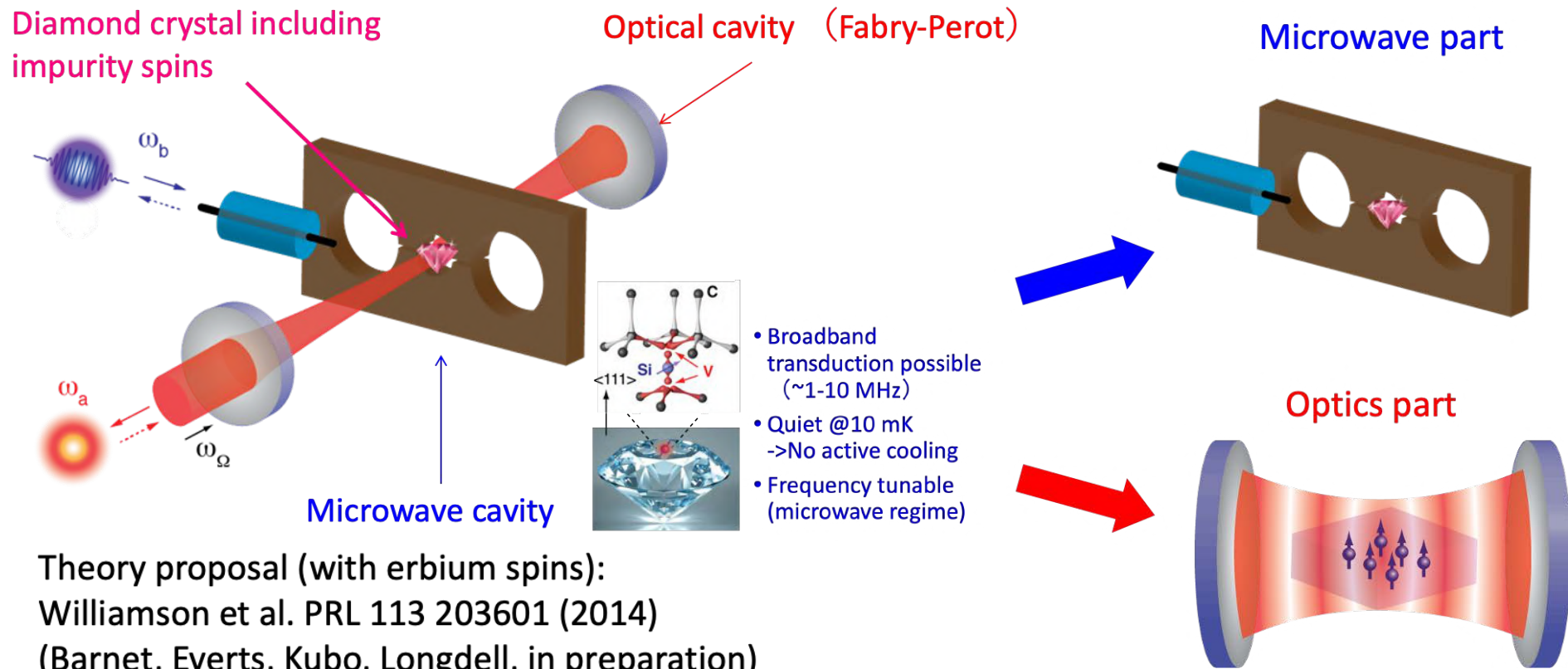


10年目：
ネットワーク化された超伝導量子コンピュータ



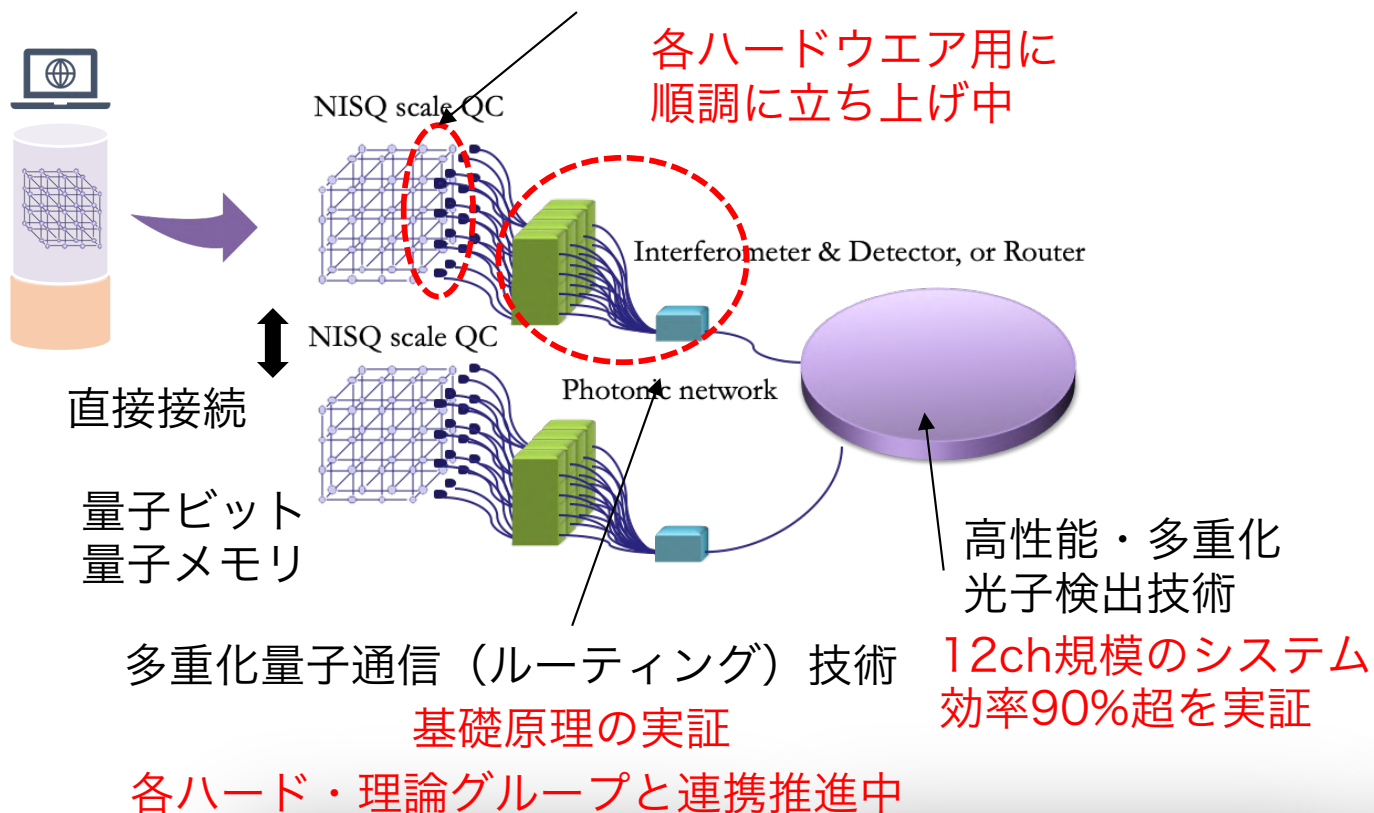
研究開発項目 4：超伝導ネットワーク型技術

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)



理論提案および光・マイクロ波複合共振器デバイスの設計・試作中

光との量子インターフェース（トランスデューサ）



量子情報技術

目次

はしがき	
要約	
Summary	
第1章 量子情報技術の概要	山本 俊 ●
第2章 研究開発の動向	
量子コンピュータ	藤井 啓祐・市川 寛 ●
量子シミュレータ	山下 真 ●
量子センシング	根来 誠 ●
量子通信・ネットワーク	山本 俊 ●
第3章 社会実装（実用化）と社会への影響及び課題	
量子情報技術の今後の展開と社会への影響	山本 俊 ●
量子情報技術に取り組む企業の動向	野口 裕信 ●
ユーズ企業の取組	松岡 智代 ●
人材育成・大学教育システム	松岡 智代 ●
資格制度と人材育成	松岡 智代 ●
特許出願傾向	町田 尚子 ●
第4章 世界各国の政策	藤田 維明・山下 真 ●
第5章 総括	山本 俊 ●

量子情報技術の調査報告書
4月以降にオンライン利用

