



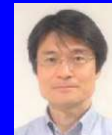
ムーンショット型研究開発事業 目標6

「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型汎用量子コンピュータを実現」

公開シンポジウム2022
2022年3月11日

量子計算網構築のための量子インターフェース開発

PM：小坂英男



横浜国立大学 量子情報研究センター・センター長



横浜国立大学、東京大学、東京医歯大、産業技術総合研究所、
物質・材料研究機構、量子科学技術研究開発機構、情報通信研究機構 他



1. 研究開発プロジェクトの概要

2050

大規模化を達成し、誤り耐性型汎用量子コンピュータの実現

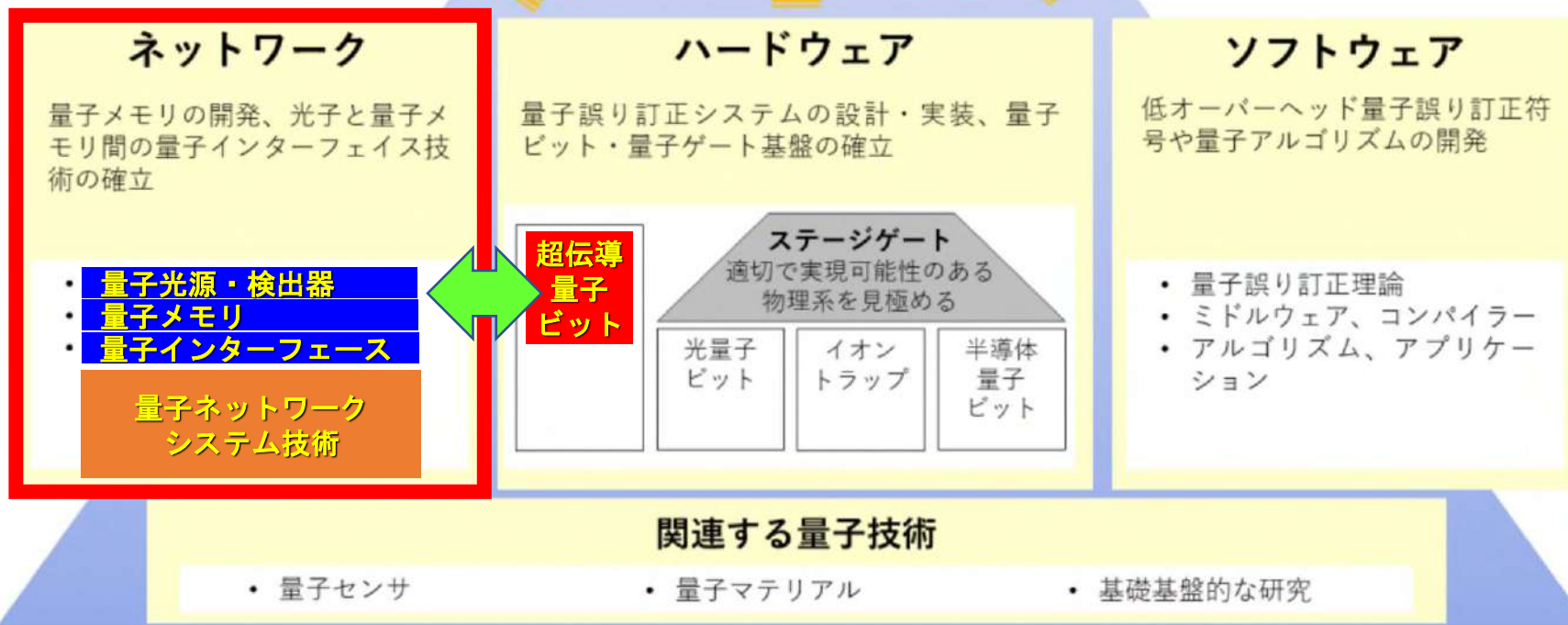
2040

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

量子ネットワーク接続で量子コンピュータの分散処理を可能に

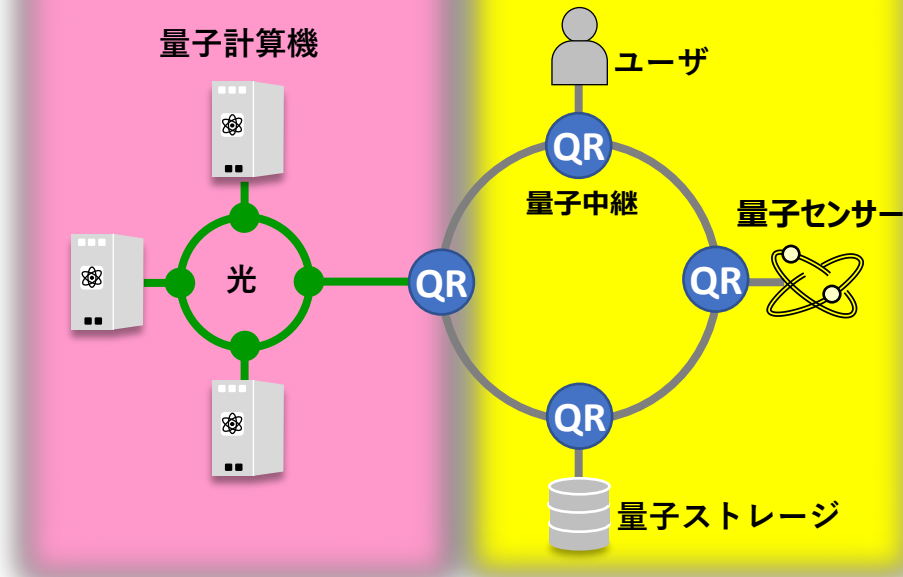
2030

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



オールクワンタム・ネットワーク (AQN: All-Quantum Network)

分散量子計算 → 量子インターネット
秘匿量子計算



ナノテク
フェーズ

デバイス
フェーズ

システム
フェーズ

プロトコル
フェーズ

サービス
フェーズ

10~30年

基礎研究

応用研究

ネットワークカテゴリー 小坂プロジェクトのタスク

量子光源・検出器

- ダイヤモンド量子もつれ光源・検出器の開発
- オプトメカニカル結晶共振器による高効率化

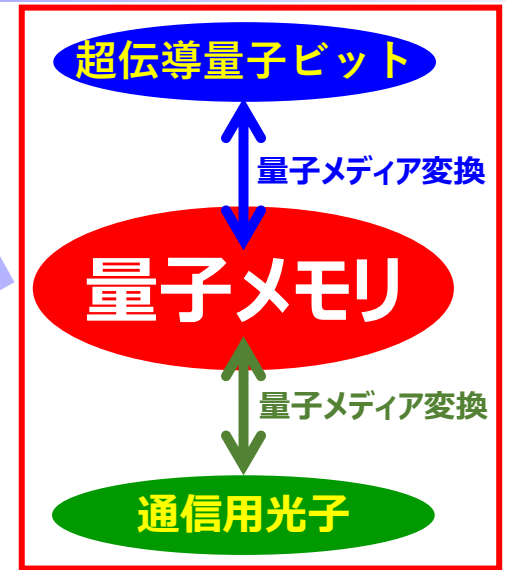
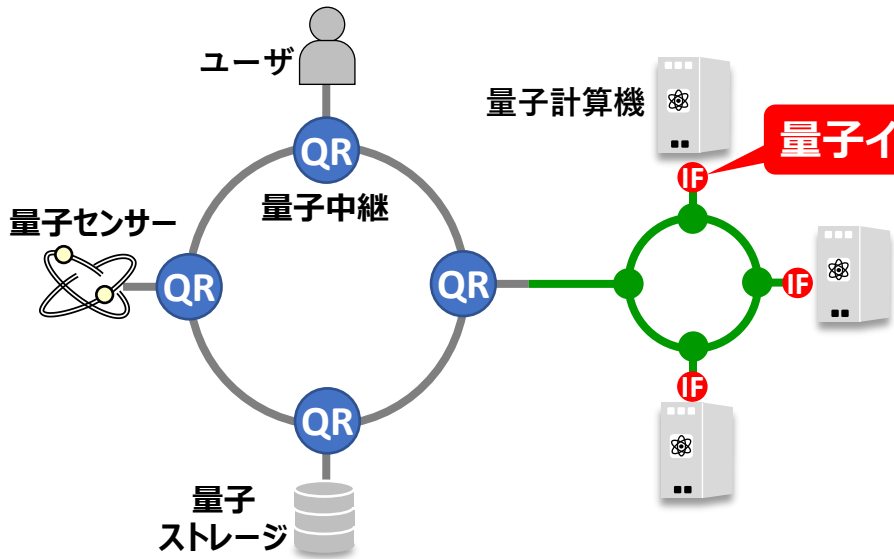
量子メモリ

- ダイヤモンド量子メモリによる誤り耐性の強化
- 量子純度ダイヤモンド結晶の開発

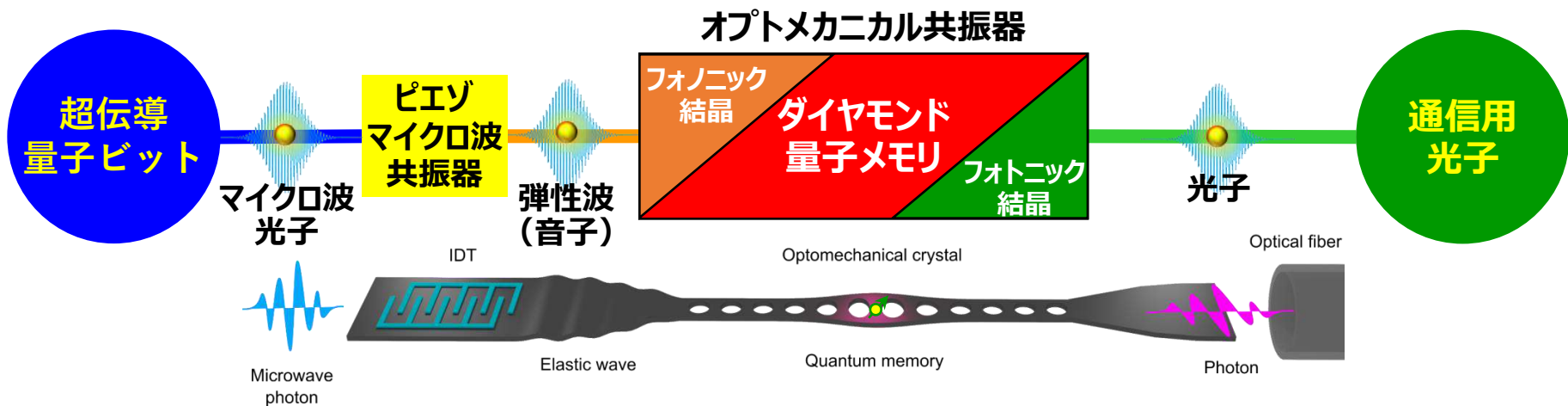
量子インターフェース

- 超伝導量子ビットと通信用光子間の量子メディア変換
- ピエゾマイクロ波共振器による高効率化

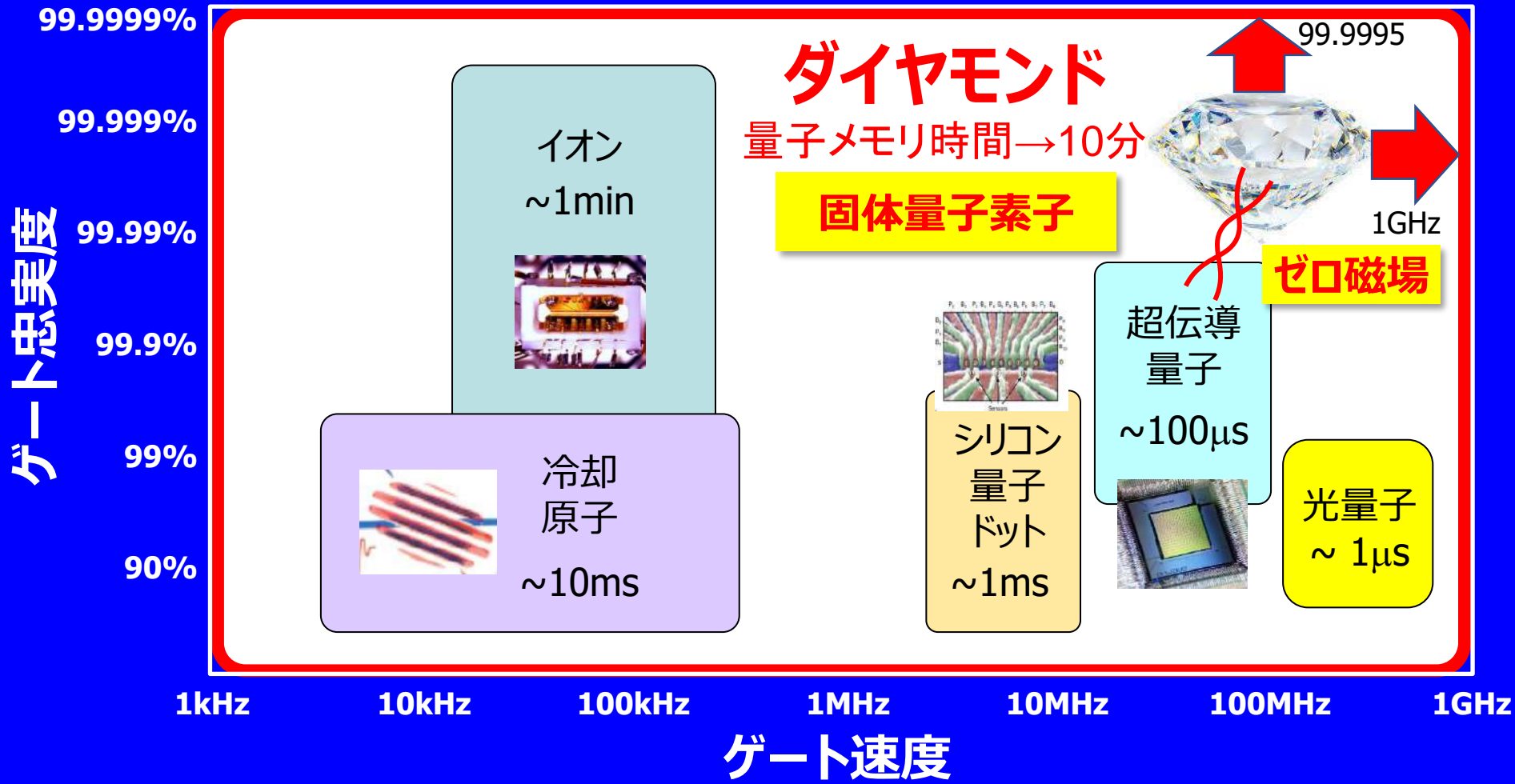
量子ネットワークシステムへの橋渡し



・量子メモリを介することで高忠実
・マイクロ波、弾性波、光子の共振器で高効率

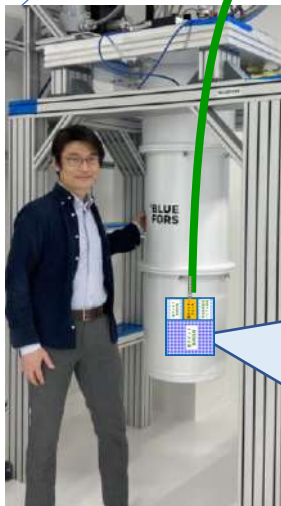
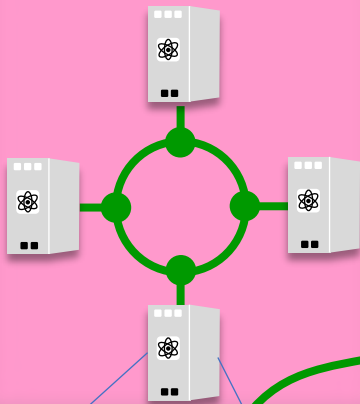


ダイヤモンドは他の計算用量子にも負けないポテンシャルをもつ

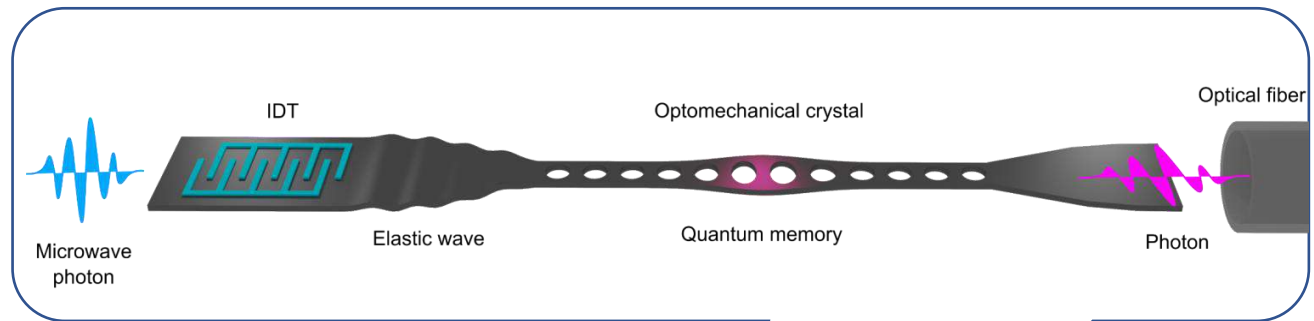


誤り耐性のある量子メモリで量子コンピュータの大規模化をサポート

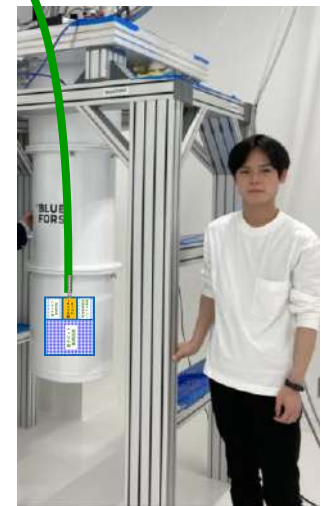
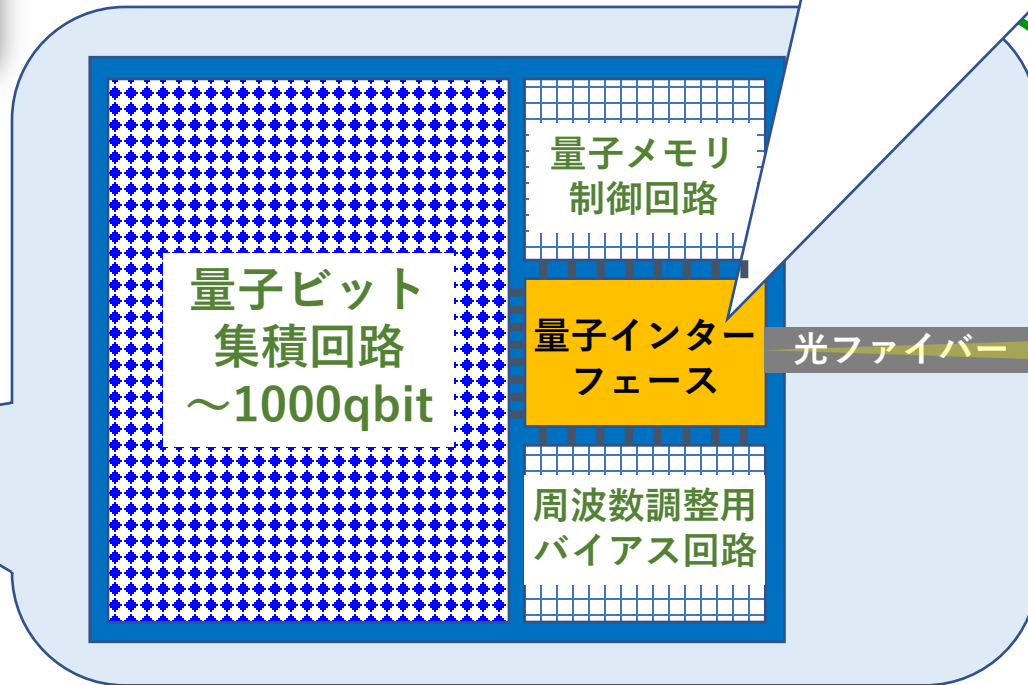
量子計算機



希釈冷凍機
(10mK)



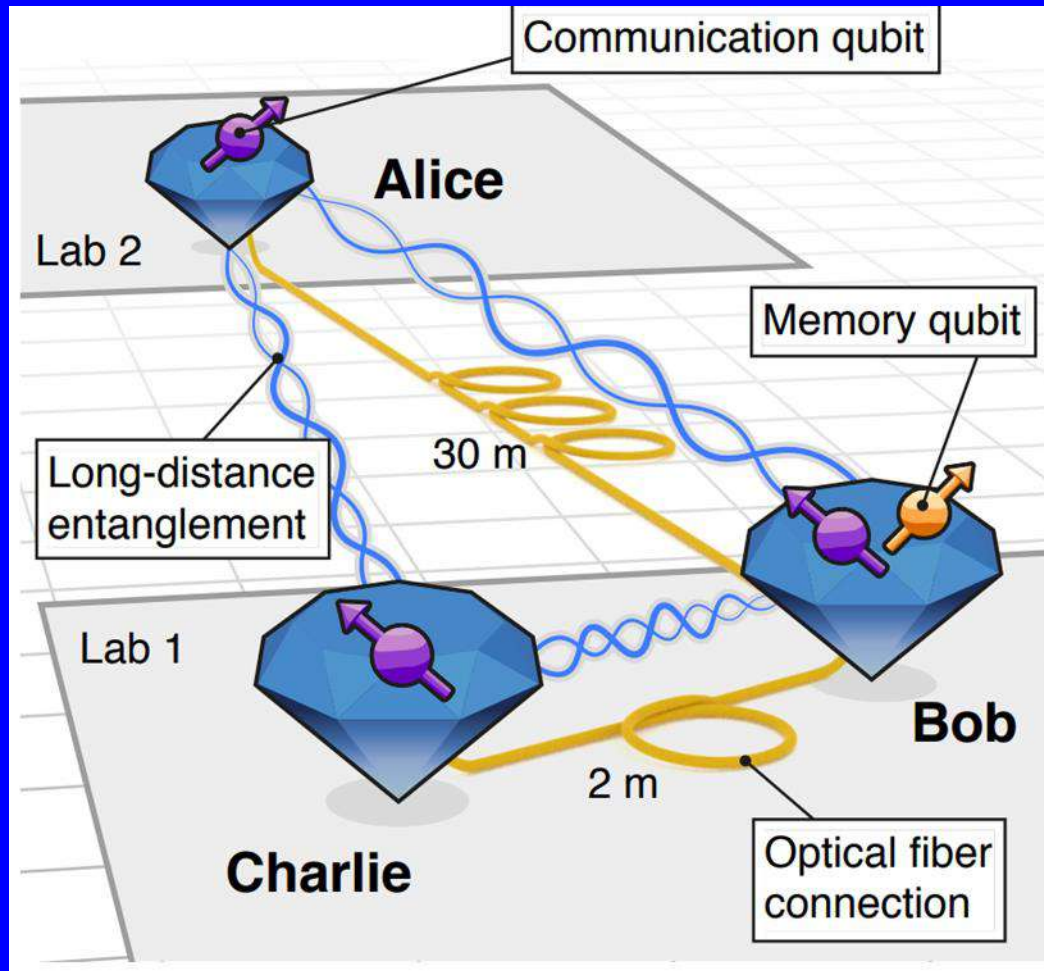
光ファイバー (室温)



2. 世界の最新動向

オランダ デルフト大学 (QuTech)

ダイヤモンドを用い3ノードの量子中継ネットワークに成功



M. Pompili et al., "Science 372, 259–264 (2021).

Science

2021年



Ronald Hanson



ダイヤモンド
量子中継

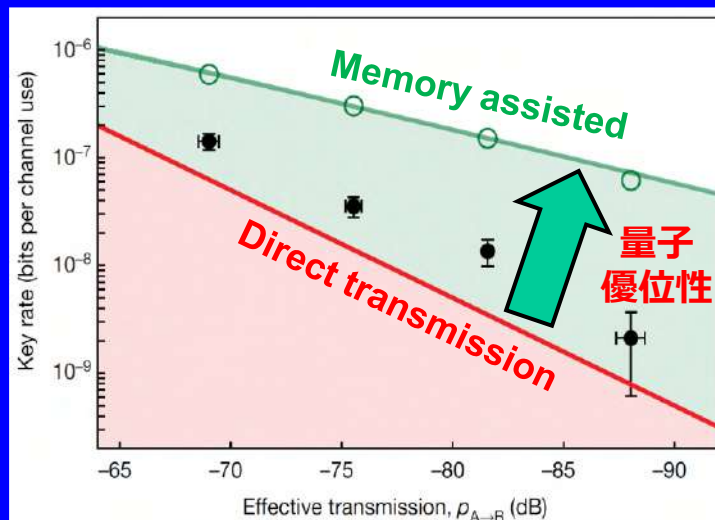
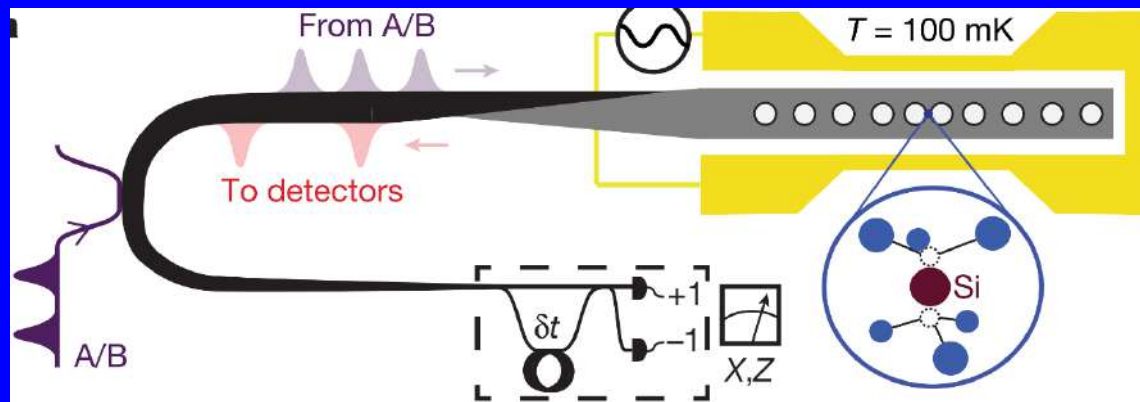
50km規模に拡大する計画

ハーバード大学

ダイヤモンドフォトリック結晶を用い量子中継の量子超越性を実証

Article

Experimental demonstration of memory-enhanced quantum communication



nature

2020年



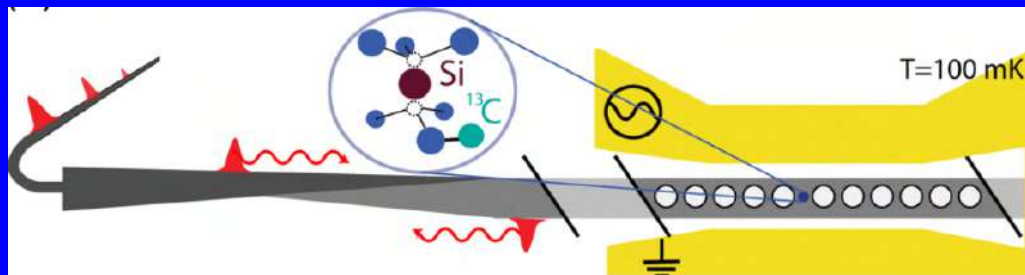
Mikhail Lukin



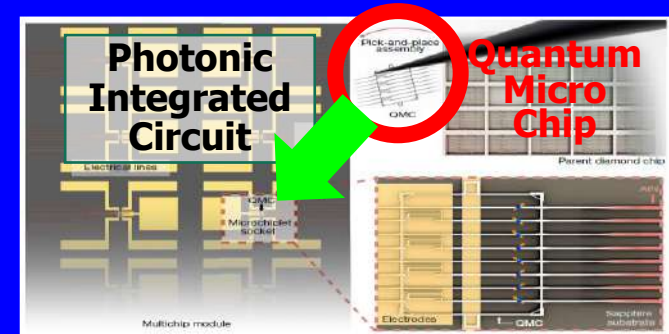
Marko Lončar

ダイヤモンドを用いた量子インターフェース

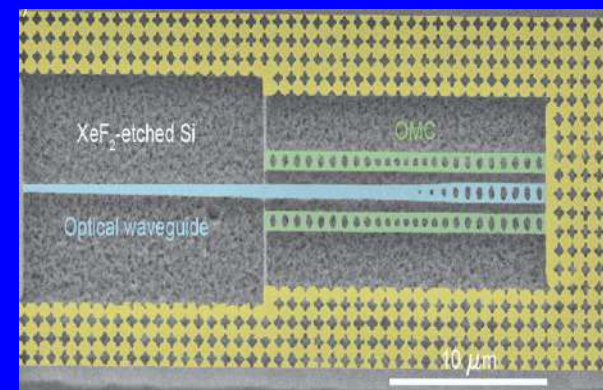
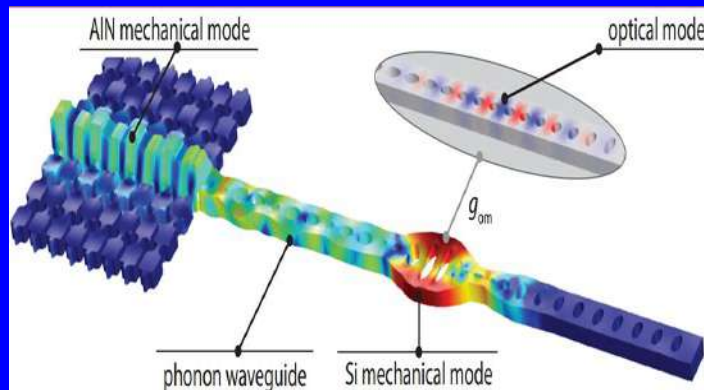
ダイヤモンドフォトニック結晶 (Harvard)



ダイヤモンド光集積回路 (MIT)



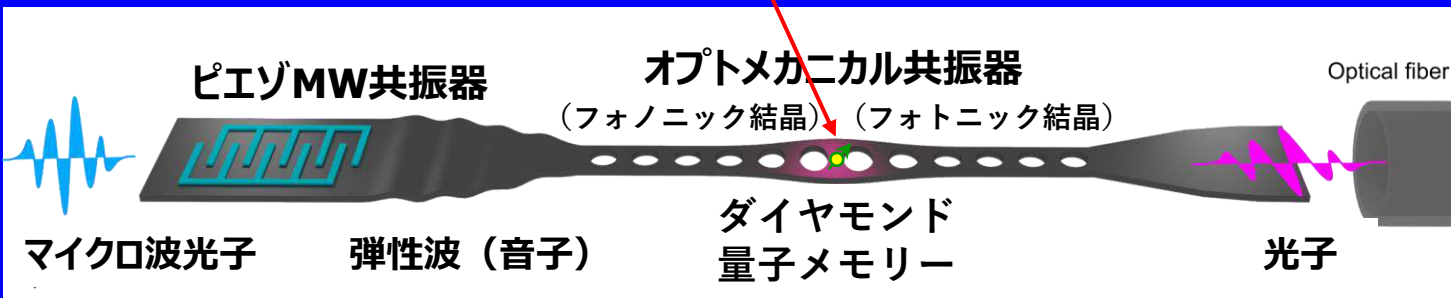
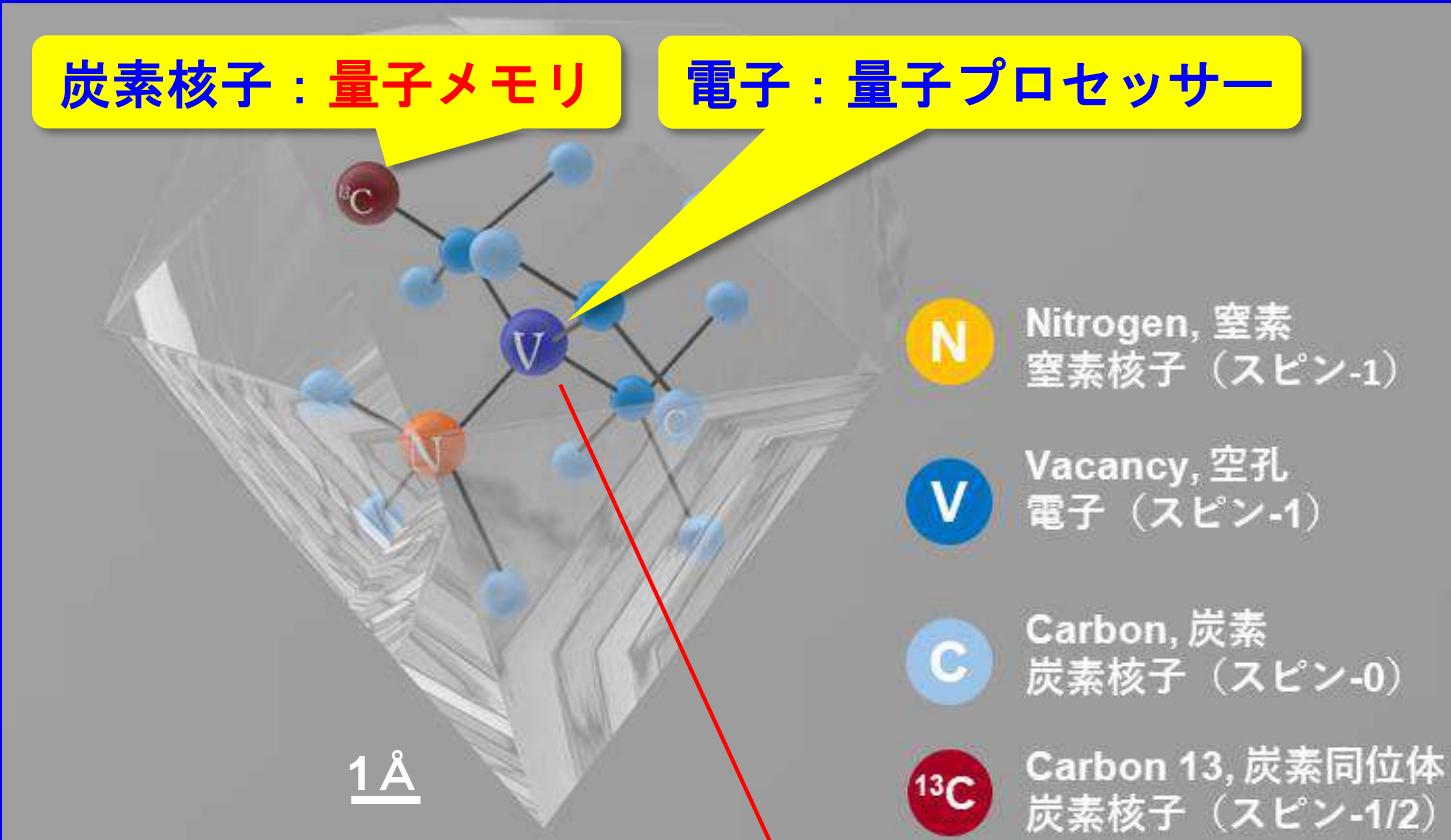
ダイヤモンドオプトメカニカル結晶 (Caltech, Stanford)



3. 研究開発プロジェクトの成果

ダイヤモンド量子インターフェースの構成

ダイヤモンド色中心の電子を介し、炭素同位体の核子に量子メモリ



量子インターフェース量子メモリに必要な機能

	機能	挑戦目標	実績
① 量子操作	操作 速度	> 1GHz	200MHz
	操作 忠実度	> 99.99%	99.5%
② もつれ生成	電子-光子 もつれ生成	> 99%	83%
③ 状態転写	光子から量子メモリへの 状態転写	> 99%	95%
④ 完全ベル測定	量子メモリ間の 完全ベル測定	> 99%	85%
⑤ 量子誤り訂正	量子メモリ間の 量子誤り訂正	> 90%	75%
⑥ 量子メモリ	量子メモリ 保持時間	> 1分	1秒
	個別アクセス量子 メモリ数	> 1K~1M	数個

ダイヤモンド量子ナノテクノロジーの世代進化

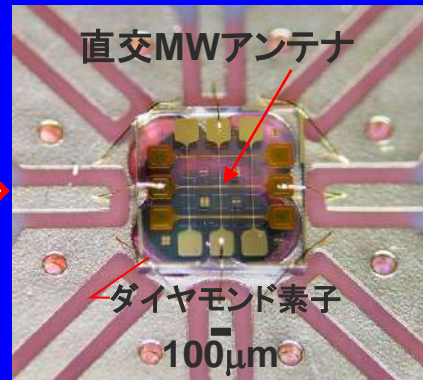
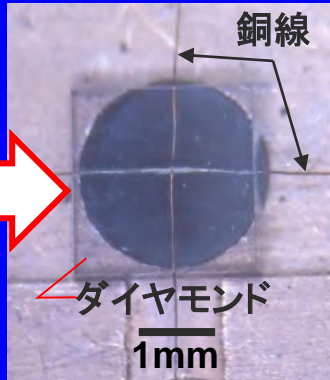
ダイヤモンド量子結晶
世界最高級純度

第0世代(1mm)

第1世代(100 μ m)

第2世代(10 μ m)

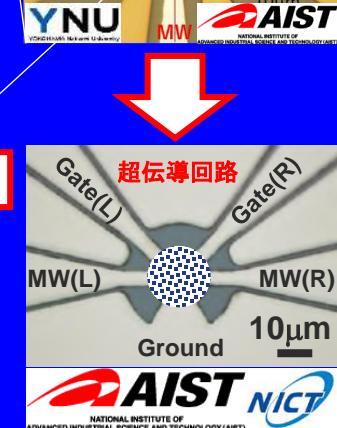
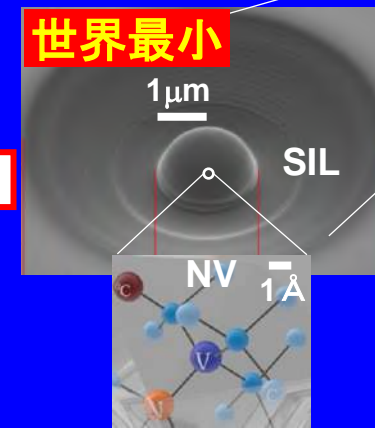
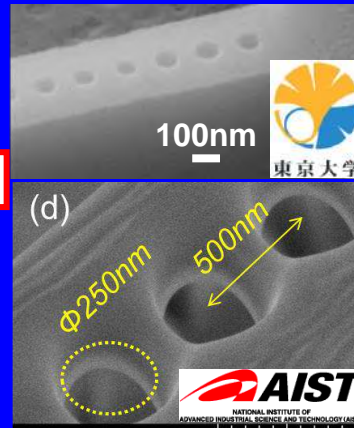
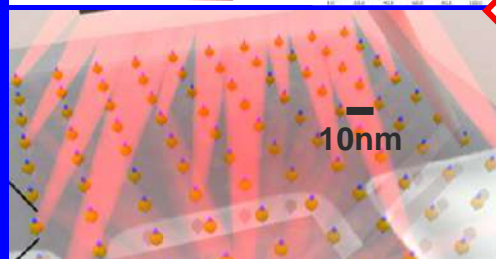
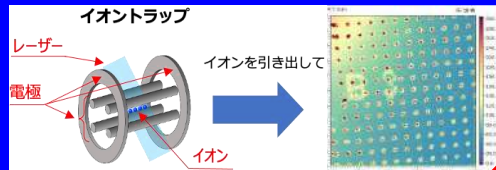
- ◎電荷安定性
- ◎同位体制御
- 結晶歪み
- △スペクトル幅



第5世代(10nm)

第4世代(100nm)

第3世代(1 μ m)



冷却イオントラップによる高精度イオン注入
大規模集積 ~1Mbits
光ランダムアクセス

ダイヤモンド
フォトニック結晶
1000倍の効率アップ
が見込まれる

世界最小
ダイヤモンド
SIL微細加工
50倍の吸収・発光
効率アップを達成

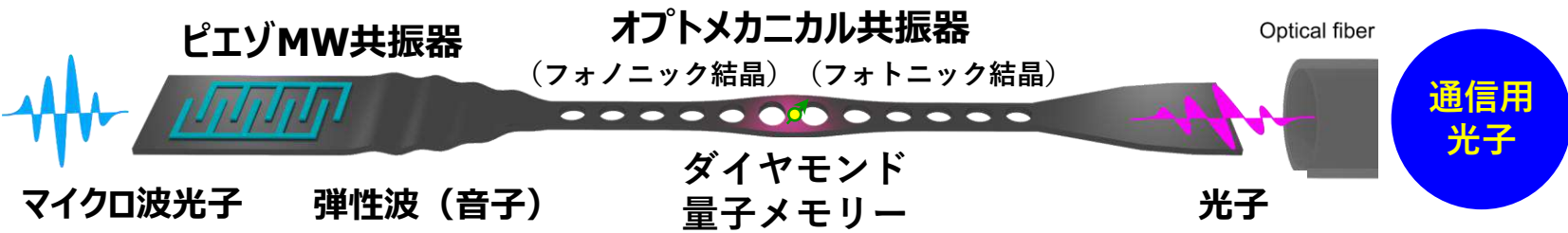
世界初の
超伝導MW回路
1GHz量子クロック
を可能に!

量子インターフェース要素技術の準備状況

材料・加工
設計・評価

<p>500nm AIN</p>	<p>diamond</p>	<p>(d) φ250nm 500nm diamond</p>	<p>SnV Sn-118, Sn-117, Sn-119, Sn-115</p>	<p>Diamond on Silicon</p>
<p> piezoelectric material selection & prototyping</p>	<p> diamond high-purity growth</p>	<p> photonic (N) notch crystal fabrication</p>	<p> color center generation</p>	<p> transfer printing technology</p>

超伝導量子ビット



山本剛Pj
NEC
AIST
RIKEN
NICT

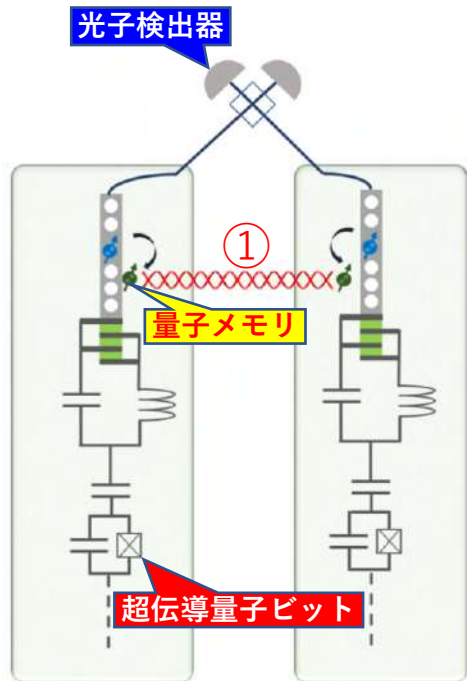
<p>量子制御回路設計</p> <p>YNU</p>	<p>piezoelectric resonator design</p> <p>$\eta > 10\%$</p> <p>YNU, RIKEN</p>	<p>phononic crystal design</p> <p>$Q \sim 1,000$</p> <p>YNU, 東京大学</p>	<p>quantum memory quantum operation</p> <p>$F > 99.9\%$</p> <p>YNU</p>	<p>photonic crystal design</p> <p>$Q \sim 12,000$ $F_p > 333$</p> <p>YNU, 東京大学</p>	<p>integrated optical coupling structure design</p> <p>Loss < 1dB</p> <p>YNU</p>
----------------------------	--	--	--	---	---

量子ネットワーク動作(メモリ方式)

Step 1

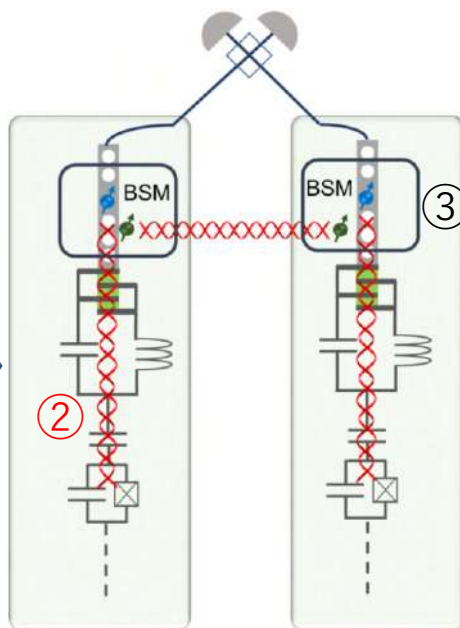
量子メモリ間
もつれ生成

単一光子干渉スキーム



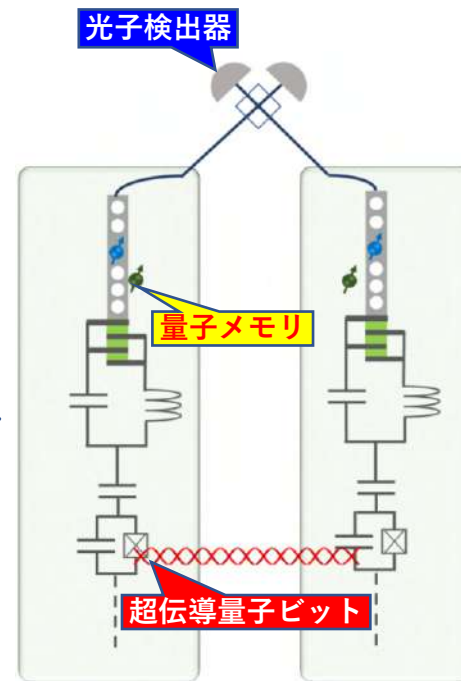
Step 2

量子メモリ-超伝導量子ビット間
もつれ生成



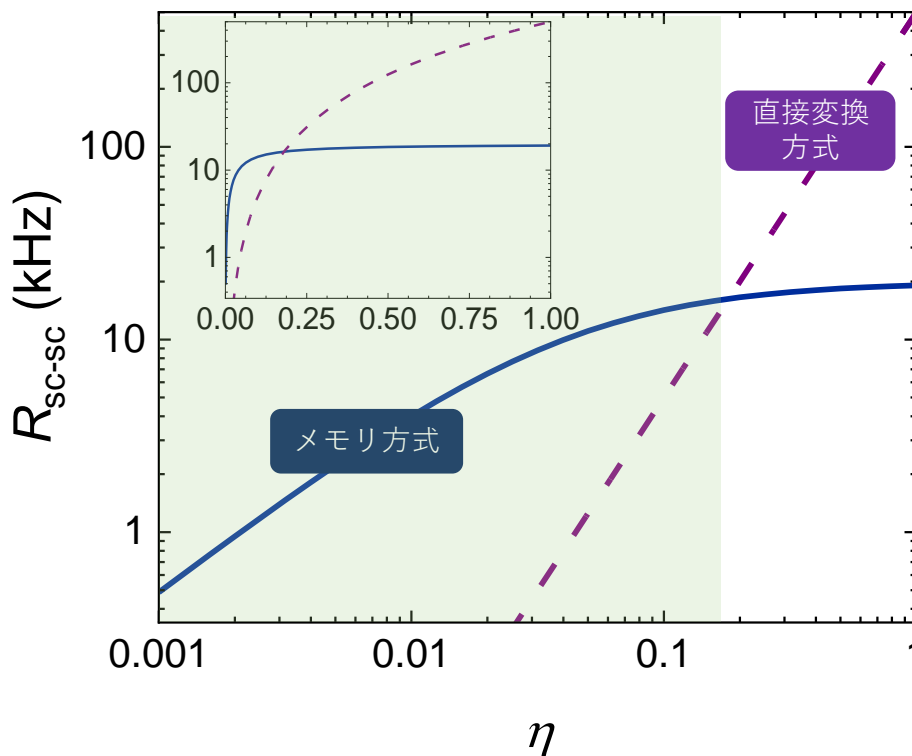
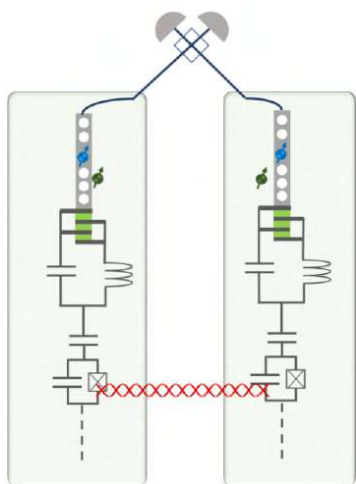
Step 3

超伝導量子ビット間
もつれ生成



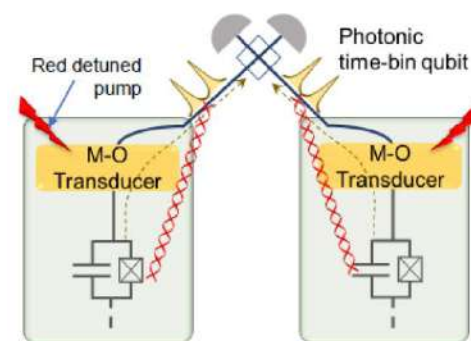
超伝導量子ビット間のもつれ生成レート

メモリ方式

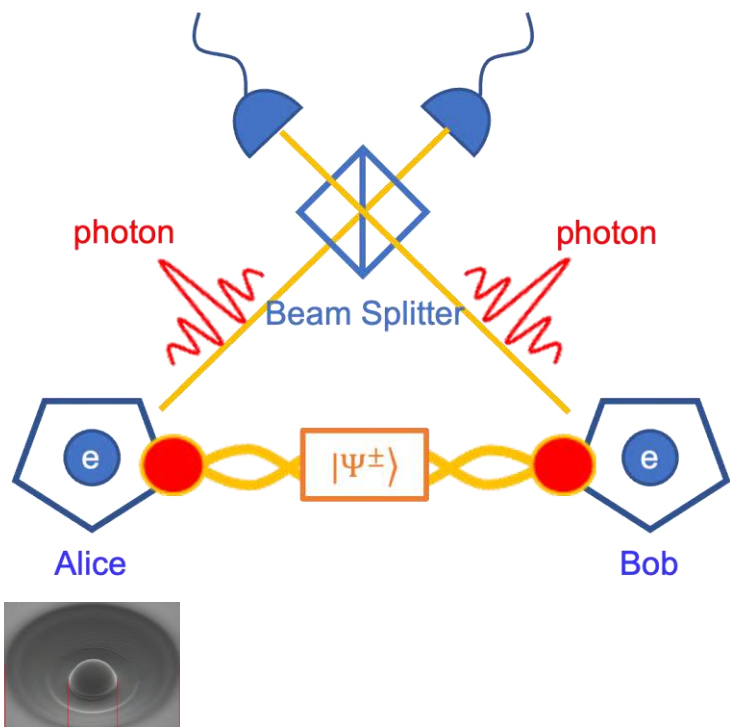


η
励起効率あるいは変換効率

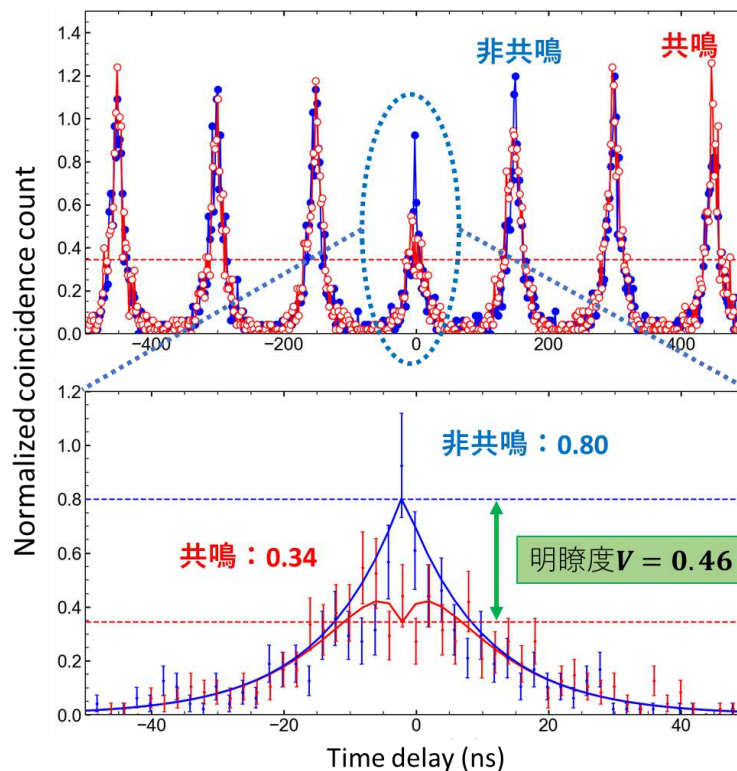
直接変換方式



単一光子干渉スキーム



ダイヤモンドからの散乱光子と微弱コヒーレント光との干渉実験



理論から予想される値の90%の明瞭度で単一光子干渉に成功
(Preliminary)

4. 研究開発体制

研究開発体制

PM 小坂英男

(横浜国大 教授・量子情報研究センター長)



代表機関 : 横浜国立大学

PM支援組織 : 先端科学高等研究院



▶ 技術補佐、知財プロデューサー、アウトリーチ担当 etc

日本最強のナノテク集団が結集！

ダイヤモンド量子メモリ

- ▶ 小坂 英男 (横浜国大)
ダイヤモンド量子メモリの研究開発
- ▶ 加藤 宙光・牧野 俊晴(産総研)
ダイヤモンド量子構造の研究開発
- ▶ 寺地 徳之(物材機構)
ダイヤモンド量子結晶の研究開発
- ▶ 小野田 忍(量研機構)
ダイヤモンド色中心の研究開発



主要な参加者 :

▶ 藤井知(豊橋技大)

弾性波制御技術



オプトメカニカル共振器

- ▶ 岩本 敏 (東大)
フォトニック結晶光共振器の研究開発
- ▶ 馬場 俊彦(横浜国大)
フォトニック光共振器実装技術開発
- ▶ 野村 政宏(東大)
フォノン結晶音共振器の研究開発



主要な参加者 :

▶ 田辺 克明(京大)

基板融着技術



ピエゾマイクロ波共振器

- ▶ 小坂 英男 (横浜国大)
ピエゾマイクロ波共振器の研究開発
- ▶ 吉川 信行(横浜国大)
量子制御電子集積回路の研究開発
- ▶ 越野 和樹(東京医歯大)
量子インターフェースの理論研究



主要な参加者 :

- ▶ 寺井 弘高 (NICT)
- ▶ 猪股 邦宏(産総研)
- ▶ 佐々木 遼(理研)
- ▶ 島津佳弘(横浜国大)

超伝導共振器技術

▶ 井上史大(横浜国大)

3次元実装技術



山本剛MS、小芦MS、中村QLEAPと連携

横浜国立大学 量子情報研究センター



~50名

量子情報研究センター
Quantum Information Research Center



教授	助教	助教	助教	准教授	研究員	教授	教授	教授	准教授	研究員
教授	助教 Assistant Professor 関口 雄平 Yuhel Sekiguchi	特任教員 (助教) Specially Appointed Assistant Professor 黒川 穂高 Hodoka Kurokawa	特任教員 (助教) Specially Appointed Assistant Professor 上 敬瑛 Akira Kamimaki	特任教員 (准教授) Specially Appointed Associate Professor 藤井 新一郎 Shinichiro Fujii	客員研究員 Visiting Researcher 知的財産プロデューサー Intellectual Property Producer) 熊澤 金也 Kinya Kumazawa	教授	教授	客員教授 Visiting Professor 寺井 弘高 Hiroataka Terao	客員准教授 Visiting Associate Professor 田辺 克明 Katsuki Tanabe	客員研究員 Visiting Researcher 佐々木 遼 Ryo Sasaki

MS全課題推進者6名を客員教員として招聘 その他：技術員5名+秘書6名+学生20名

国内連携

総務省委託事業「グローバル量子暗号通信網構築のための研究開発（量子中継技術）」

企業・国研と連携



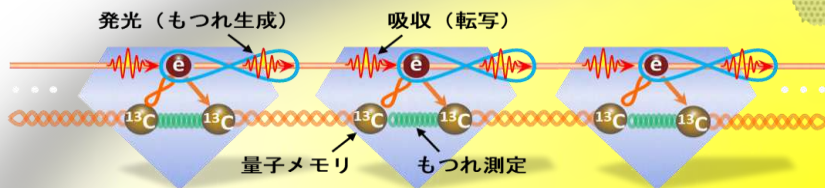
TOSHIBA

取りまとめ

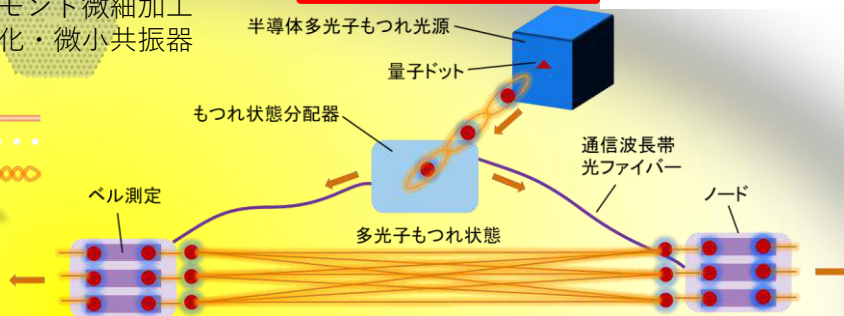
量子メモリ量子中継

ダイヤモンド量子メモリ

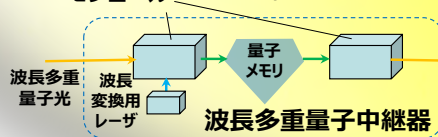
ダイヤモンド微細加工
高機能化・微小共振器



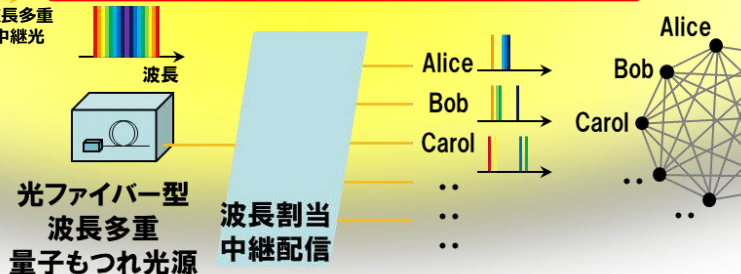
全光量子中継



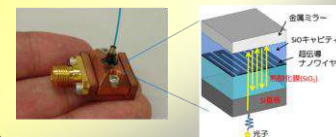
量子波長変換モジュール



波長多重量子ネットワーク



超伝導単一光子検出器



国内連携

政府提言/教育組織・研究センターと連携



申請中を含む

国際連携



CHICAGO
QUANTUM
EXCHANGE



Andrew Cleland
米 シカゴ大

David Awschalom
米 シカゴ大



Jonathan Finley
独 ミュンヘン工科大

Kai Mueller
独 ミュンヘン工科大



Martin Maldovan
米 ジョージア大



Christoph Nebel
独 フラウンフォーファー



Ronald Hanson
蘭 デルフト大



Joerg Wrachtrup
独 シュツットガルト大



Friedemann Reinhard
独 ミュンヘン工科大



Oliver B. Wright
日本 北大



Vincent Laude
仏 CNRS



Tim Taminiau
蘭 デルフト大



Fedor Jelezko
独 ウルム大



Christoph Becher
独 ザールランド大

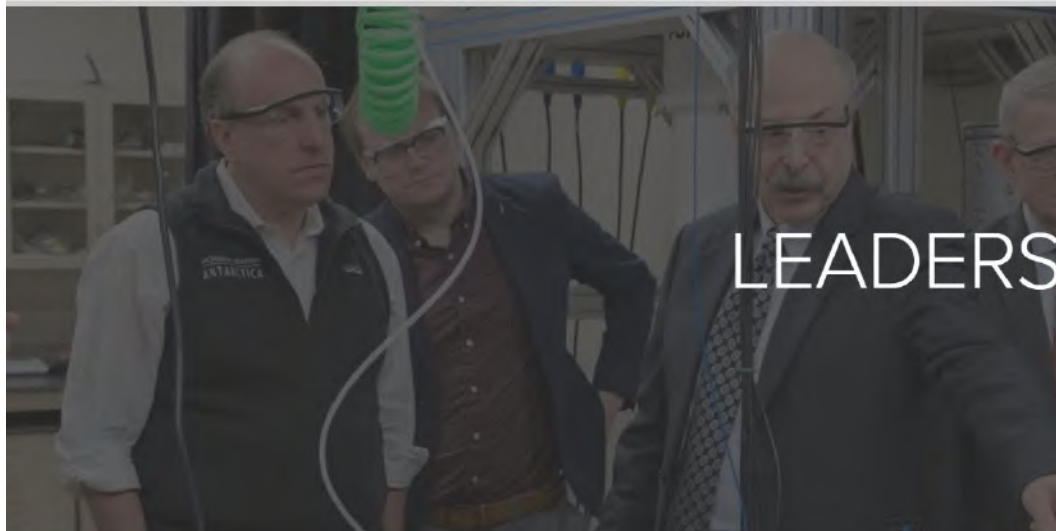


未来の量子融合フォーラム

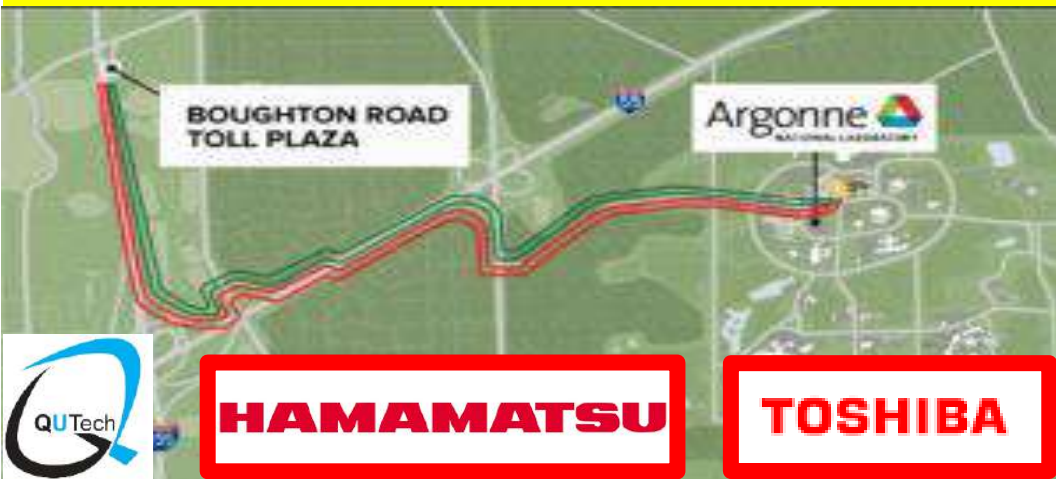




9大学,12企業がサプライチェーン構築



CHICAGO Quantum Exchange



Academia



Industry





shutterstock.com • 1220651788

Quantum Technology Flagship













QUANTUM INTERNET ALLIANCE

EU加盟国を中心とした 量子インターネット関連Pj (2019~) サプライチェーンを構築中

... a Quantum Internet that enables
... points on Earth

Leading actors from industry



 <p>AUSTRIAN ACADEMY OF SCIENCES – IQOQI The Institute for Quantum Optics and Quantum Information (IQOQI) of the Austrian Academy of Sciences dedicates its work to theoretical and experimental basic research in the areas of quantum optics ...</p>	 <p>CNRS The National Center for Scientific Research, or CNRS, is a public organization under the responsibility of the French Ministry of Education and Research. ...</p>
 <p>ICFO ICFO is a young research institution that aims to advance the very limits of knowledge in Photonics: the science and technology of harnessing Light.</p>	 <p>INSTITUTO DE TELECOMUNICAÇÕES Instituto de Telecomunicações (IT) is a national research institute in Portugal, rated Excellent in its international assessments. ...</p>
 <p>MAX PLANCK INSTITUTE OF QUANTUM OPTICS En Route to the New Quantum World – Even one century after its discovery quantum physics still remains extremely fascinating. ...</p>	 <p>NIELS BOHR INSTITUTE - UNIVERSITY OF COPENHAGEN In reconfigurable optical devices, light-matter interactions can be made so strong that quantum mechanical effects are decisive. ...</p>
 <p>QUTECH – TU DELFT QUTEch is an advanced research center for quantum computing and quantum sensors, a collaboration founded by Delft University of Technology and TNO.</p>	 <p>SORBONNE UNIVERSITY Sorbonne Université is a new university with a corporate and tradition, through the merger of UPMC and Paris-Sorbonne on 1st January 2018. ...</p>
 <p>UNIVERSITY OF BASEL Our research is focused on quantum optics, i.e. the application of quantum theory to phenomena involving light and its interaction with atomic and mechanical systems. ...</p>	 <p>UNIVERSITY OF GENEVA Quantum Memories are devices that can store the quantum state of a photon, without destroying the visible quantum information. ...</p>
 <p>UNIVERSITY OF INNSBRUCK The Innsbruck Physical Research Center is committed to carry out excellent, world-class competitive research addressing a broad range of modern topics in physics.</p>	 <p>UNIVERSITY OF STUTTGART Science at the Institute comprises solid state quantum optics and systems with applications in modern microscopy and metrology. ...</p>

まとめ

ネットワークカテゴリー（小坂プロジェクト）のタスク

量子ネットワーク接続で量子コンピュータの分散処理を可能に

誤り耐性のある量子メモリで量子コンピュータの大規模化をサポート

量子光源・検出器

- ダイヤモンド量子もつれ光源・検出器の開発
- オプトメカニカル結晶共振器による高効率化

量子メモリ

- ダイヤモンド量子メモリによる誤り耐性の強化
- 量子純度ダイヤモンド結晶の開発

量子インターフェース

- 超伝導量子ビットと通信用光子間の量子メディア変換
- ピエゾマイクロ波共振器による高効率化

- ・ 量子メモリを介すことで高忠実
- ・ マイクロ波、弾性波、光子の共振器で高効率

日本最強のナノテク集団が結集！

企業・国研・研究センター・海外機関と広く連携

助教および博士研究員募集中

- 横浜国立大学 量子情報研究センター
特任教員（助教）
- 横浜国立大学 大学院工学研究院
非常勤教員公募（博士研究員）

光分野・スピン分野・物性分野・超伝導分野
電子デバイス分野・システム分野

<https://kosaka-lab.ynu.ac.jp/recruit.html>

A close-up photograph of a complex piece of scientific or industrial machinery. The device is primarily black and metallic, with numerous cables and connectors. Several blue and green cables are visible, some plugged into ports. The background is dark, and the lighting highlights the intricate details of the equipment. The text "ご清聴ありがとうございました。" is overlaid in the center of the image.

ご清聴ありがとうございました。

量子メモリーの有効性

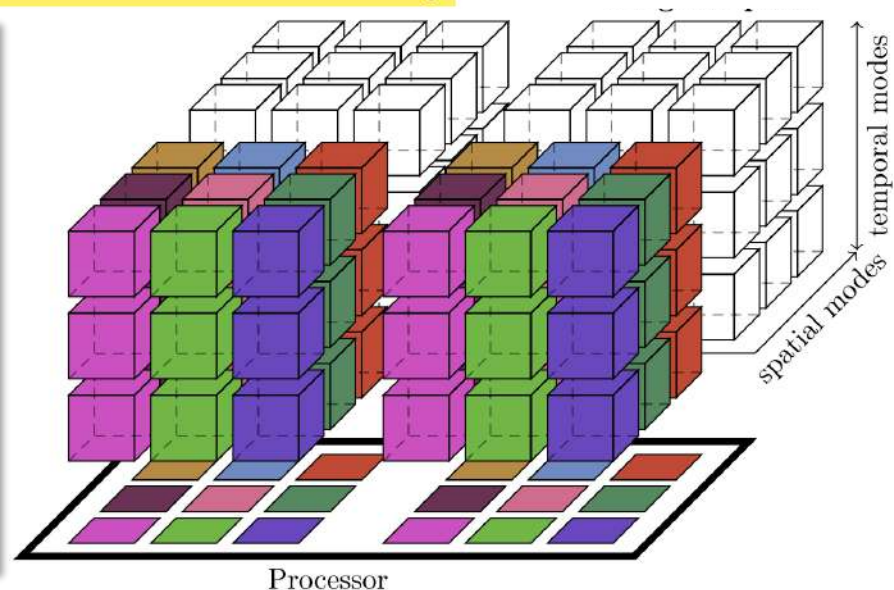
PHYSICAL REVIEW LETTERS 127, 140503 (2021)

Editors' Suggestion

Featured in Physics

Factoring 2048-bit RSA Integers in 177 Days with 13 436 Qubits and a Multimode Memory

量子メモリーの実装により
量子プロセッサのビット数を
大幅に削減できる



multiplexed memory to store the qubit states between processing steps. Concretely, for a characteristic physical gate error rate of 10^{-3} , a processor cycle time of 1 microsecond, factoring a 2 048-bit RSA integer is shown to be possible in 177 days with 3D gauge color codes assuming a threshold of 0.75% with a processor made with 13 436 physical qubits and a memory that can store 28 million spatial modes and 45 temporal modes with 2 hours' storage time. By inserting additional error-correction steps, storage times of 1 second are shown to be sufficient at the cost of increasing the run-time by about 23%. Shorter run-times (and storage times) are achievable by increasing the number of qubits in the processing unit. We suggest realizing such an architecture using a microwave interface between a processor made with superconducting qubits and a multiplexed memory using the principle of photon echo in solids doped with rare-earth ions.