

# NTTの量子技術への取り組み

日本電信電話株式会社

2020年9月4日

NTT研究所では、1980年代初頭から量子技術の研究に取り組んでいる。  
近年は、NTT研究所の強みを活かし、量子情報処理、量子通信・量子暗号、  
量子センシング、量子マテリアル領域について重点的に研究に取り組んでいる。

## NTTが取り組んでいる量子技術

### 量子情報処理

- イジング型コンピュータ
- ・光量子NISQ
- 光量子の誤り訂正  
(ボゾニックコード)

### 量子通信・量子暗号

- ・量子暗号鍵配送
- 量子中継
- ・量子メモリ

### 量子センシング

- 光格子時計
- ・核磁気共鳴
- 電子スピン共鳴

### 量子マテリアル

- ・トポロジカル物質
- フォトニック結晶
- ・次世代半導体

○：次頁以降で、紹介。

## NTTの強み

フォトニクス、材料科学、極限エレクトロニクス、ナノ加工技術を  
ベースとした量子技術



# 量子情報処理関連

# 次世代コンピュータへの期待

「ムーアの法則」が終焉に近づく



従来の計算機が苦手としていた問題を物理システムを用いて解く試みが世界の有力企業で加速

難しい問題

NP (Non-deterministic Polynomial) グラフ同型問題  
結び目問題

やさしい問題

NP-困難  
MAX-CUT  
イジングモデル

組合せ最適化問題  
スケジューリング  
リソース配分  
ルート検索  
サンプリング  
スパース推定

NP-完全  
充足問題  
Sudoku

自動定理証明  
グラフ彩色問題

BQP (Quantum Polynomial)

因数分解、離散対数

P (Polynomial)

素数判定  
最短距離

パターンマッチング  
かけ算・足し算

コヒーレントイジングマシン  
"LASOLV"

量子アニーリング (D-Wave, Google, NASA)  
素子：超伝導、応用：組合せ最適化

量子コンピュータ (IBM, Google 他)  
素子：超伝導、応用：素因数分解



※現在数十量子ビットであり、  
計算機としては基礎研究段階

NTT、他 (ImPACT)



素子：光(レーザ)  
応用：組み合わせ最適化  
常温動作

# コヒーレントトイジングマシン / LASOLV

光通信技術を使って新しい計算機を実現。現在、10万ビット化を推進中。

位相感応増幅器 (特定の位相のみを増幅) 【参考】に詳細

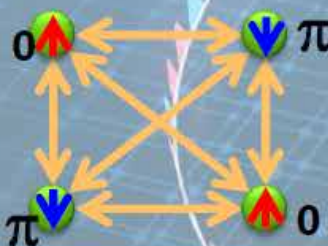
PSA

光パルスが何周もするうちに、最も安定した状態 (位相の組合せ) を見つける

➔ 問題の答え

測定 (光パルスの一部を読み取る)

光ファイバー





光パルスの位相を人工スピンとした光学実験で、相互作用するスピンの理論モデル「イジングモデル」の基底状態を求める新しい計算機

フィードバック (パルスの相互作用を与える)

PSU

問題設定ユニット (問題に相当する相互作用を設定)

光パルス

 位相 0 (ゼロ)	 位相 0
 位相 π (パイ)	 位相 π

# ベンチマーク : D-Waveマシンとの比較

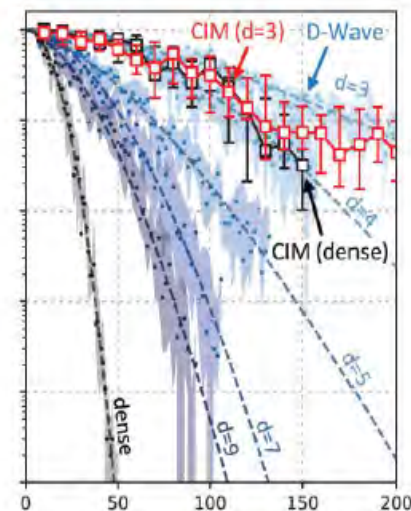
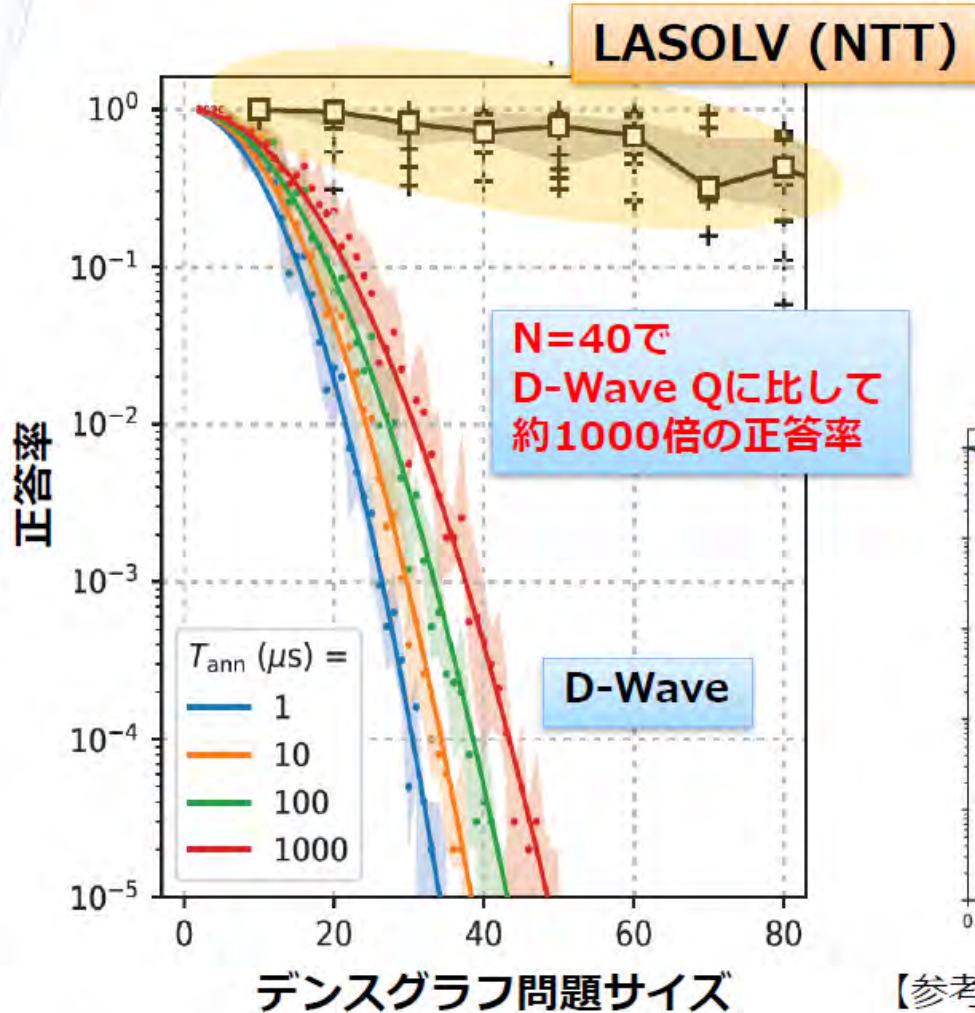
組合せ最適化 (最大カット) 問題においてLASOLVの優位性を確認

R. Hamerly *et al.*, *Sci. Adv.*, **5**, eaau0823 (2019).

LASOLV (NTT)  
2000ビットマシン



D-Wave  
NASA-AmesのD-Wave Qで  
得た離散エッジ {1,0}、  
エッジ密度50%の  
最大カット問題の正答率



【参考】スパースグラフの場合

LASOLVは、D-waveマシンよりも、  
大規模で複雑な組合せ最適化問題を正確に解くことが可能

# 米国NTT研究所：Physics & Informatics Lab.(PHI LAB) において、米国の研究パートナーともLASOLVの研究実施。

発足：2019年7月、米国パロアルト

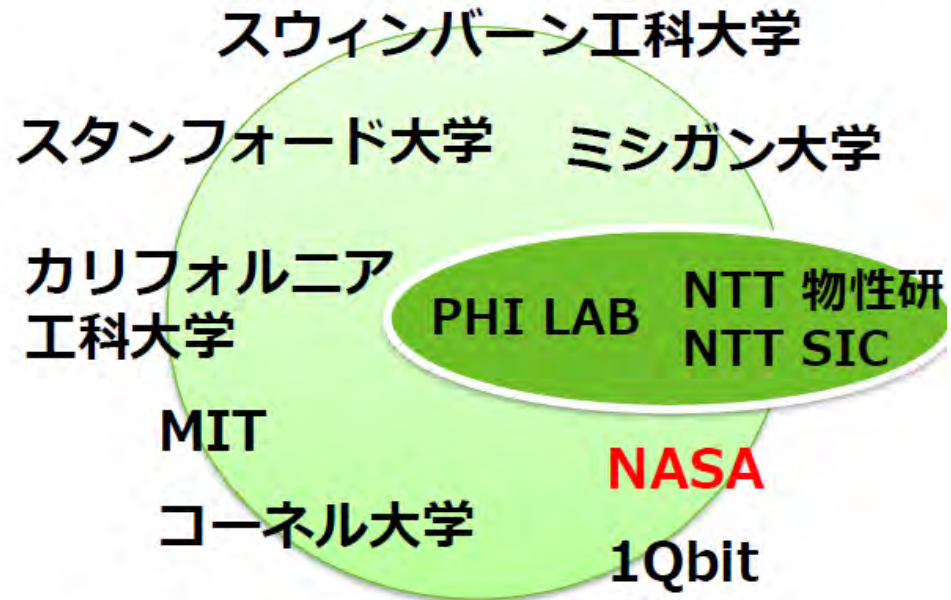
## 研究パートナー



Director

**山本 喜久**

- スタンフォード大学 名誉教授
- 国立情報学研究所 名誉教授
- 元 NTT 基礎研究所



Distinguished Scientist:

**Robert L.Byer 教授**

- スタンフォード大学 応用物理学科

量子コンピューティングの共同研究チーム  
 (教授13名、研究メンバ30名)

• Stanford、Caltech、Cornell、NASAとの共同研究で  
 NSFのファンド「Expeditions in Computing awards」を獲得  
 (\$10M/5年)

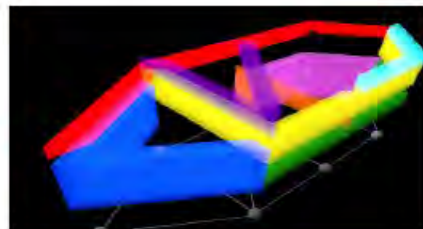
# LASOLV Computing System と SDK (Software Development Kit)

## SDKの開発によりユーザーインターフェイス (I/F) が大きく向上

- LASOLVハードと、問題を解きたい人の間を繋ぐソフトウェアを開発してI/Fを統一
- I/Fを通じ、社会・産業界における複雑な組合せ最適化問題を、ハードで処理可能な形式に変換
- 台数の限られるハードを、ユーザ認証やジョブ制御により、複数人で安心・安定して有効利用

### マルチレート光パス波長割当の最適設計問題

- 通信経路が重なる区間で、周波数がバッティングしないこと
- なるべく周波数の無駄遣いがないように、詰め込んで割り当てること





# 誤り耐性量子コンピュータ

大規模な量子コンピュータは、古典コンピュータと異なり、誤り訂正が必要

古典コンピュータと比べると  
量子コンピュータは非常に大きな誤り率

例) スーパーコンピュータ「京」は  
ノードあたり10億時間当たり36程度の誤り  
(誤り訂正や冗長回路を使った値)



誤り耐性汎用量子コンピュータ

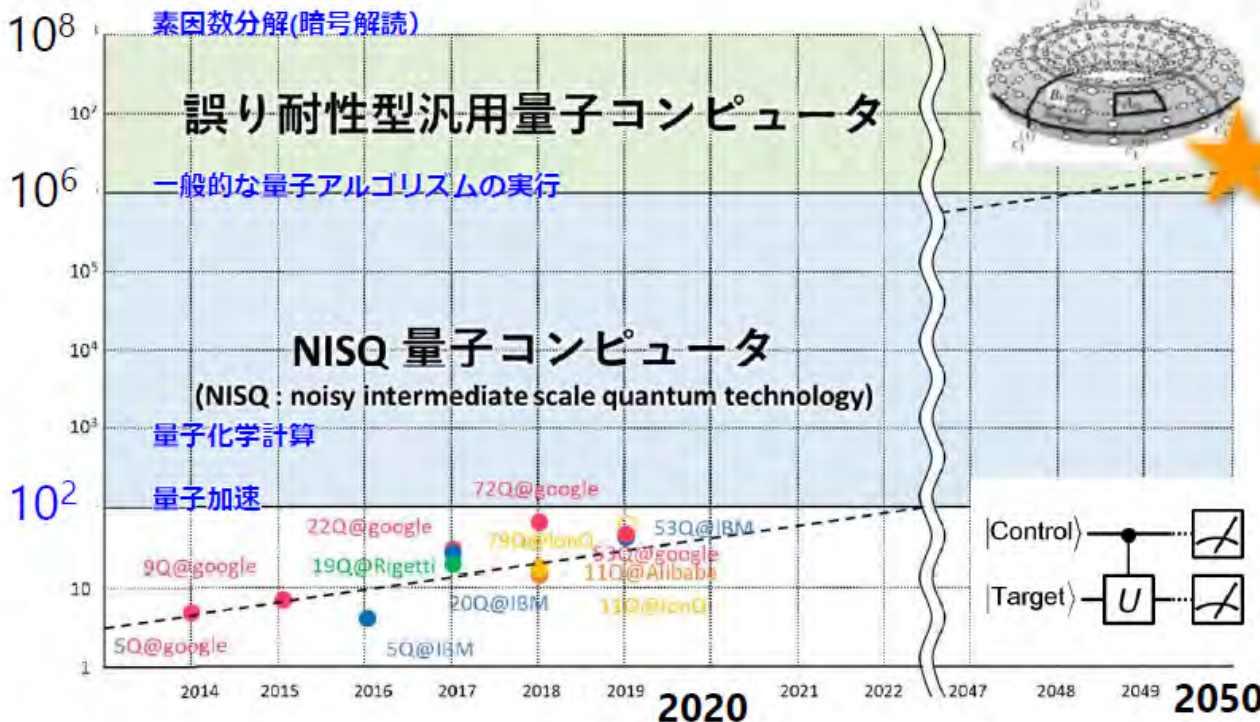
Fault-tolerant universal quantum computer

《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」

量子ビット数



# NTTのアプローチ（東京大学との連携）

お互いの強みを活かした共同研究で、汎用光量子コンピュータを実現

量子誤り耐性 = 量子符号化技術 × 量子デバイス技術

## 《光量子コンピュータ》

利点：量子のエネルギーの大きさに応じて、概ねゲート速度・動作温度が決まる  
～光量子コンピュータは高速動作・室温動作が可能

課題：複雑な光学回路や、低損失化、非線形操作が必要

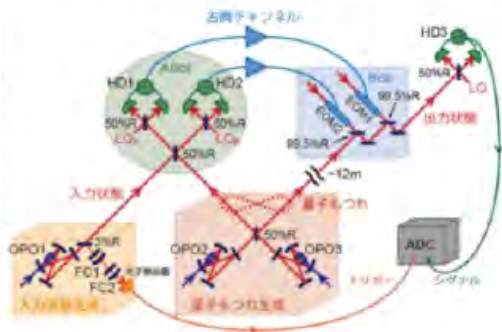
## 《光量子コンピュータに向けたNTTのアプローチ》

NTTが得意とする光技術により上記課題の克服を目指す

～光量子の波の性質を生かした光量子情報処理技術と通信で培ったデバイス技術を融合  
デバイス技術の詳細は、【参考】

東京大学

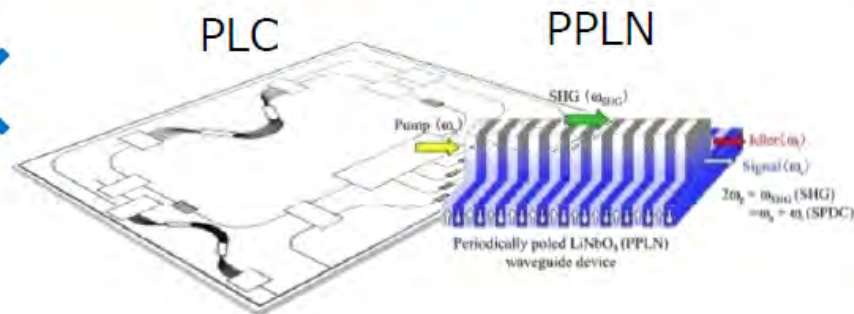
連続量（光波）による  
量子信号処理技術



NTT

最先端の光波制御  
通信デバイス技術

×

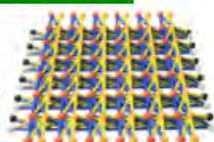
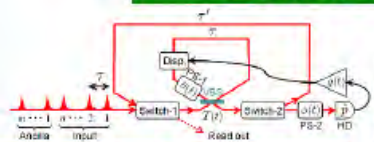


# 今後の目標（東京大学との共同研究）

2025年までに誤り耐性の基本実証が目標

最先端デバイスと量子コンピュータ  
アーキテクチャの融合

① 東京大学



② NTT



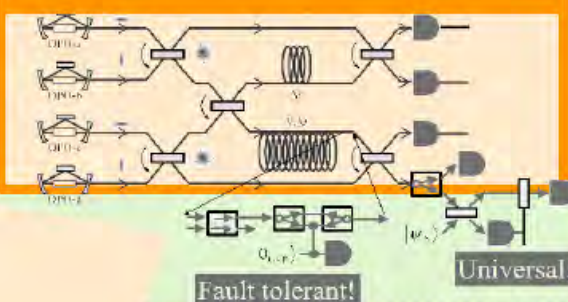
③ 東京大学



全光誤り耐性万能量子コンピュータ

① 光量子コンピューティング アーキテクチャ

② オンチップ光量子情報処理回路



③ 超伝導  
光子数  
識別

Fault tolerant!

Universal!

要求されるデバイス特性  
(スキーズドレベル)

15dB

10dB

現在の世界トップデータ  
(シングルパス型)

6.3dB (NTT, 2020)

誤り耐性 実証レベル閾値

誤り耐性 理論閾値

● 光量子全ゲート  
(誤り耐性の基本実証)

● 古典対応光量子ゲート  
(誤り耐性未対応)

● 連続量光量子  
もつれ生成

2020

2025

2050



# 量子通信・量子暗号関連

## 量子インターネット - グローバルな量子ネットワーク

ノード：量子情報処理ノード（例：量子中継器、量子コンピュータ）  
エッジ（リンク）：量子通信路（例：光ファイバ）

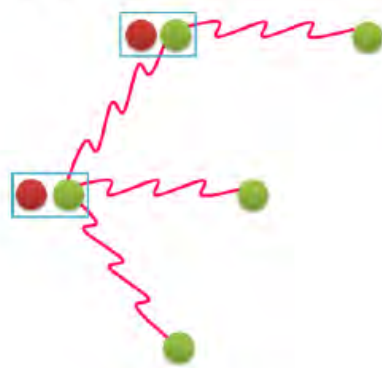


## ネットワーク化された量子を用いた新しい応用

無条件安全通信



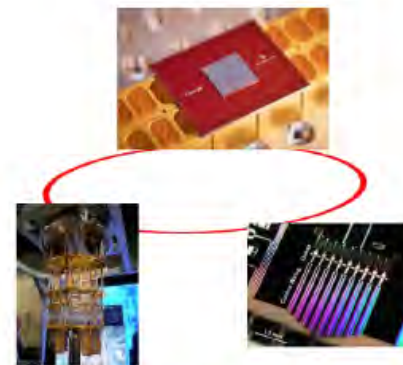
量子テレポーテーション



原子時計の超精密同期



分散量子計算



S. Wehner *et al.*, *Science* **362**, 303 (2018).

光ファイバ中の光損失によって量子通信が可能な距離が制限 (< 約400 km)



量子インターネットの構築には**量子中継技術**の研究開発が重要

K. Azuma *et al.*, *Nat. Commun.* **7**, 13523 (2016).  
K. Azuma & G. Kato, *Phys. Rev. A* **96**, 032332 (2017).

## 量子メモリを使わない新しい量子中継方式 (全光量子中継) を理論提案

### 量子中継

減衰のため量子もつれを送る距離に限界



現在考案されている量子中継方式の問題点

中継ノードで高精度の量子メモリが必要



光の量子状態を高精度で読み書き可能な物質量子メモリの実現は困難  
物質量子メモリを用いた量子中継は実現していない

物質量子メモリ

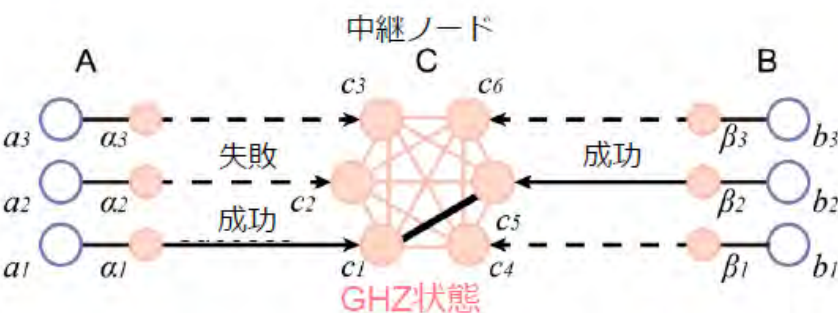
(Pic from Scientific American [Jan.13, 2011])

### 全光量子中継 :

物理量子メモリを使わないことにより、  
高速かつ常温動作が可能

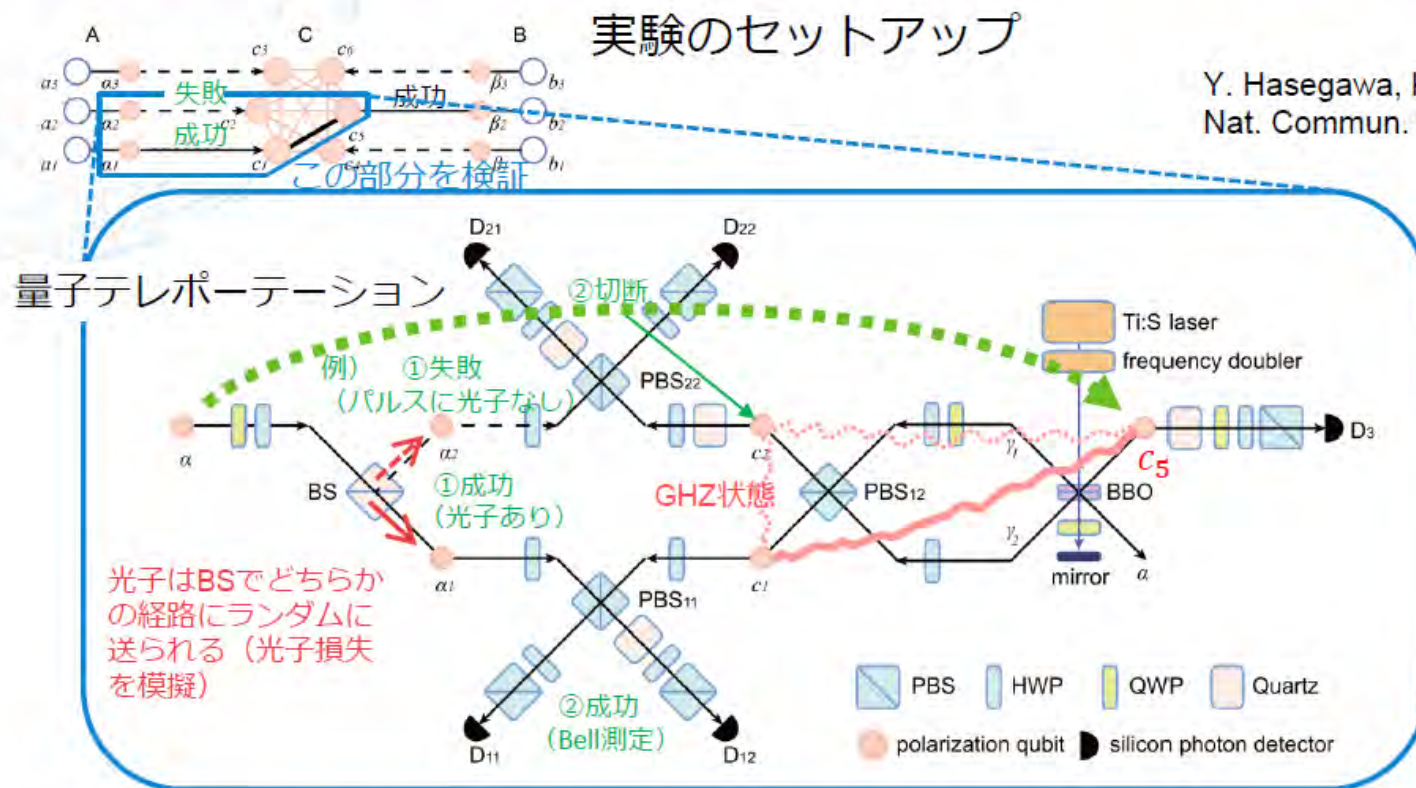


現実的な量子中継方式を世界で初めて提唱



K. Azuma et al., Nat. Commun., 6, 6787 (2015).

## 一般的な光学素子のみを用いた全光量子中継の原理検証実験に成功



## 地球規模の「全光」量子ネットワーク実現へ大きく前進

- ※ 1 本論文出版後、中国のUSTCが同様の実験成功を報告 [Z.-D. Li *et al.*, Nat. Photon. **13**, 644 (2019)]
- ※ 2 2020年7月23日付の米エネルギー省の量子インターネットの開発戦略発表の際に公表されたレポートにおいても、本論文は引用されている。