

スケーラブルで強靱な 統合的量子通信システム

プロジェクトマネージャー

永山 翔太

慶應義塾大学 政策・メディア研究科 特任准教授
株式会社メルカリ研究開発部R4Dシニアリサーチャー

ムーンショット目標6公開シンポジウム2024
2024年3月27日





未来を訊く

スケーラブルで強靱な統合的量子通信システム
プロジェクトマネージャー

永山 翔太

Shota Nagayama

ムーンショットの研究者 永山翔太 | メディア研究科 特任准教授

株式会社メルカリ 研究開発部R4D シニアリサーチャー



0:45 / 5:16 · Introduction >



"Scalable and Robust Integrated Quantum Communication System" NAGAYAMA Shota [Moonshot Goal 6]

世を革新する技術の発展

半導体
(コンピュータ)

インターネット

AI

量子
(コンピュータ)

分散量子
コンピュータ

量子インター
ネット

1970~

1990~

2012~

2030?~

2035?~

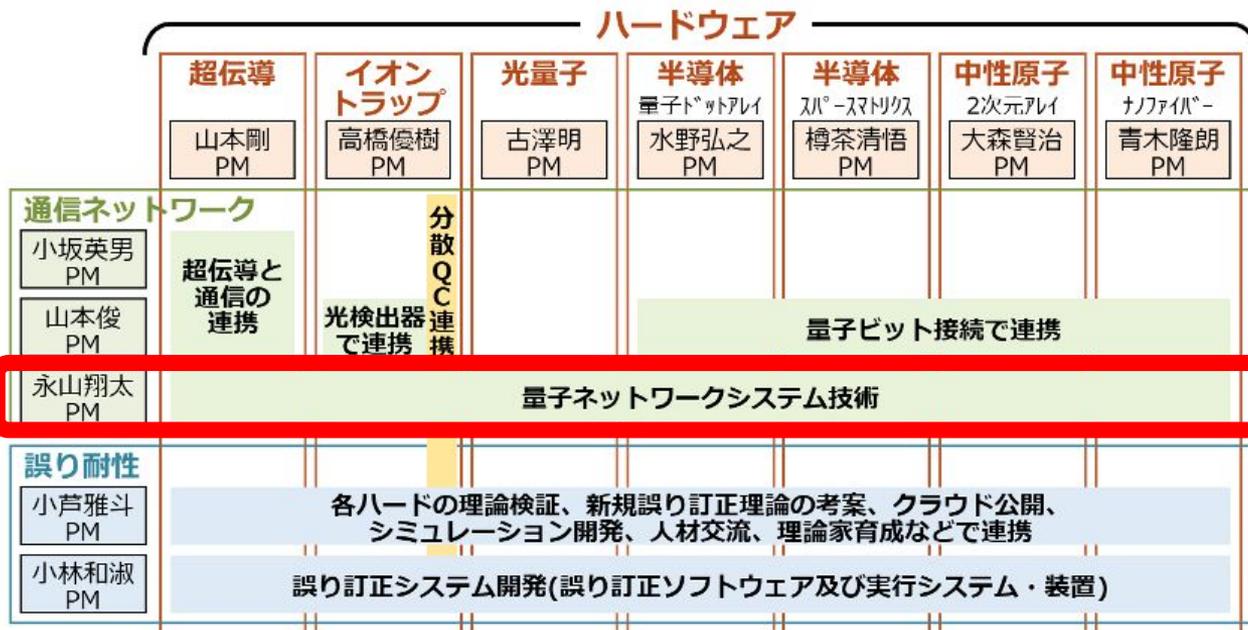
ムーンショット目標6における永山PJ

大規模分散量子コンピュータの三要素

- 量子コンピュータそのもの
- 量子通信インターフェース
- [本プロジェクト] 量子コンピュータ同士の自在な接続を可能にする量子ネットワーク

ネットワーク化による
分散量子コンピュータ

計算力 = 集積力 × 通信力



特に、量子/古典、ハード/ソフトを兼ね備えた**統合的量子ネットワークシステム・アーキテクチャ**の実証

課題推進者リスト



S. Nagayama
Keio U.
Mercari, Inc.



H. Ohno
Kanazawa U.



T. Sasaki
U. of Tokyo



K. Nemoto
OIST



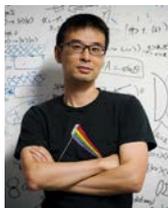
R. Van Meter
Keio U.



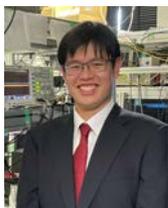
R. Ikuta
Osaka U.



M. Takeoka
Keio U.



D. Akamatsu
Yokohama
National U.



K. Niizeki
LQUOM Corp.



T. Horikiri
Yokohama
National U.



H. F. Lei
Yokohama
National U.



H. Tanji
UEC



R. Yamazaki
ICU



Y Yamaguchi
NICT



R. Sasaki
RIKEN



A. Soeda
NII



T. Satoh
Keio U.



Y. Matsuzaki
Chuo U.



A. Osada
Osaka U.

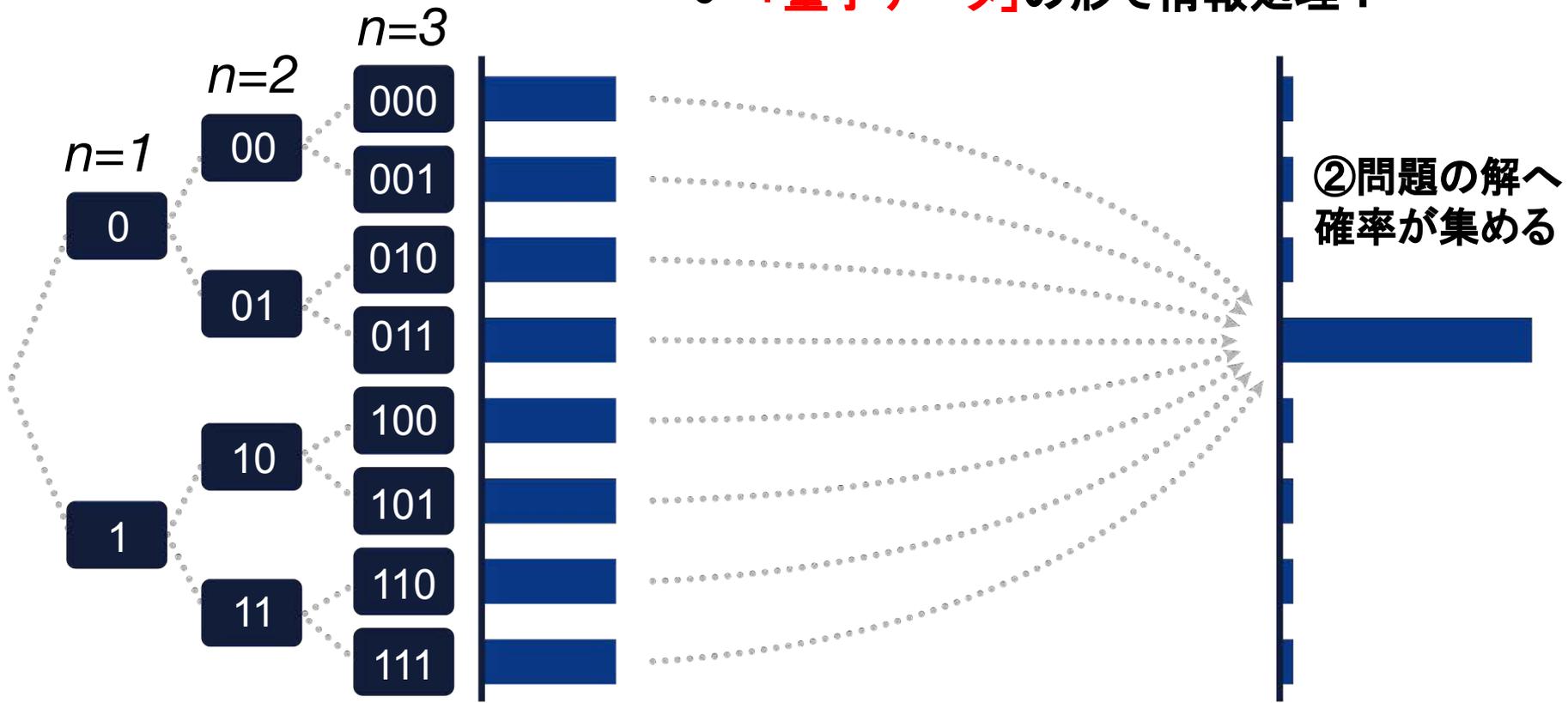


David Elkouss
OIST

分散型量子コンピュータとは

量子コンピュータとは

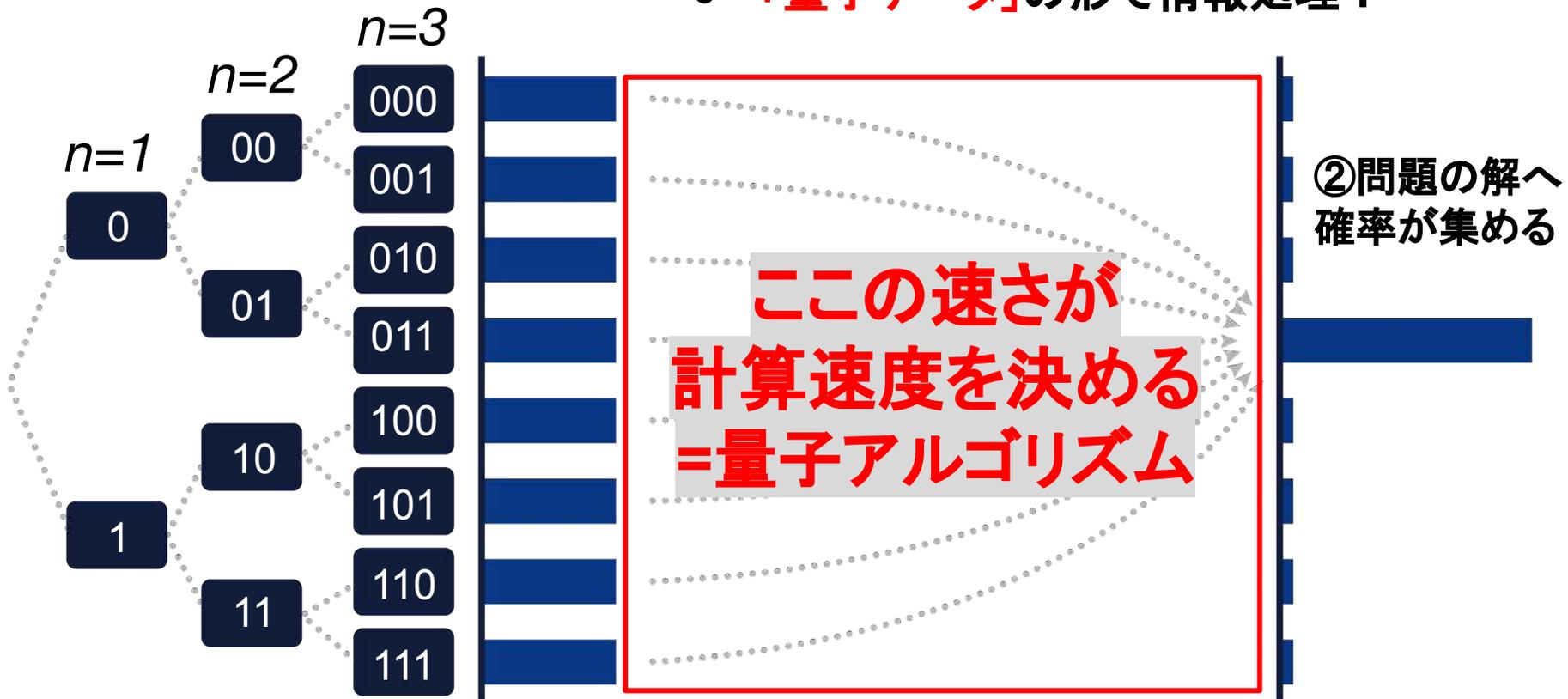
- n 量子ビットは 2^n 個の状態を持つ
- 「量子データ」の形で情報処理！



①各状態が出現確率を持っている

量子コンピュータとは

- n 量子ビットは 2^n 個の状態を持つ
- 「量子データ」の形で情報処理！



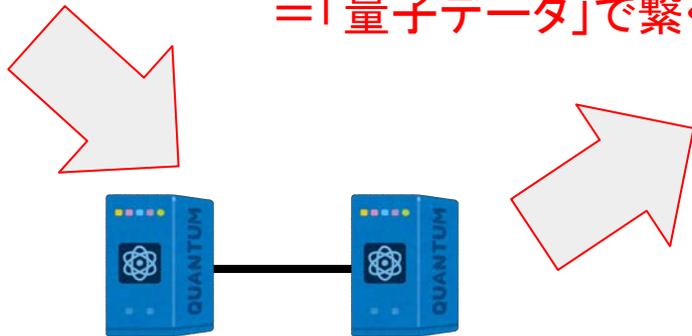
①各状態が出現確率を持っている

分散量子コンピュータ

10量子ビット: 2^{10} = 約1000個の候補の中から解を高速に見つけ出す

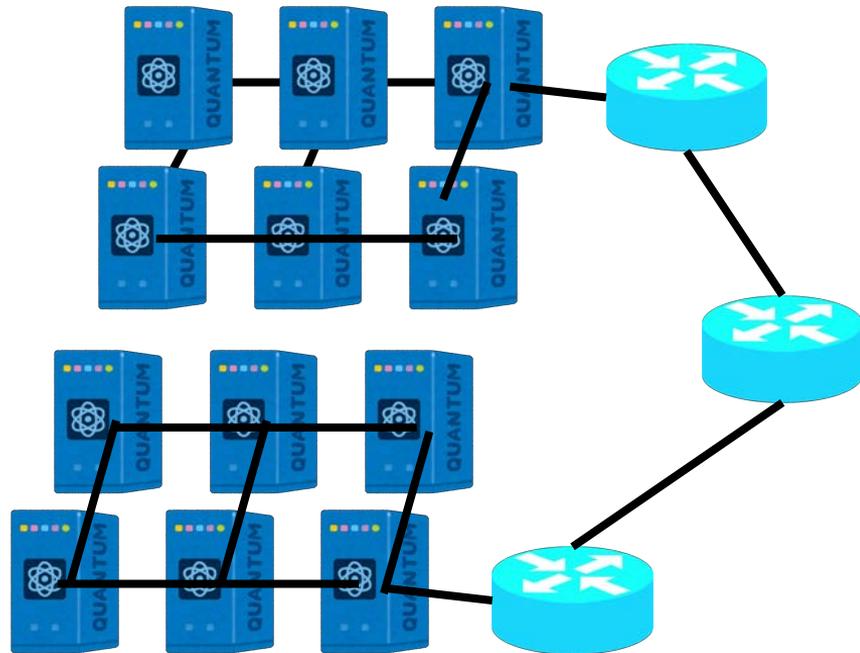


量子ネットワーク化！
=「量子データ」で繋ぐ



10+10量子ビット: 2^{20} = 約100万個の候補の中から解を高速に見つけ出す

もっとたくさん使いたい！



量子ネットワークという課題

量子コンピュータのネットワーク化

2030

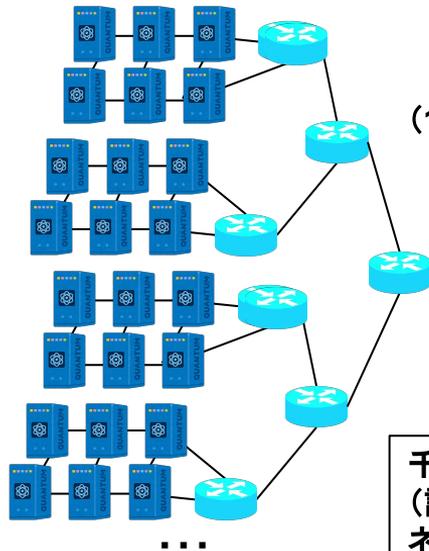
2050



量子コンピュータの開発



量子コンピュータ間の接続



誤り耐性型量子計算
(100万qubits)試算の例

イオントラップ
100qubits×1万台

超伝導
1000qubits×1千台

千～万単位の量子計算機
(計算ノード)の
ネットワーク化の時代へ

※スーパーコンピュータ富岳の光ケーブル総延長は約900km
<https://www.r-ccs.riken.jp/fugaku/system/>

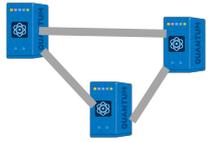
量子コンピュータのネットワーク化

2030

2050



量子計算機の開発

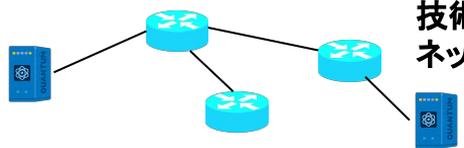


量子計算機間の接続

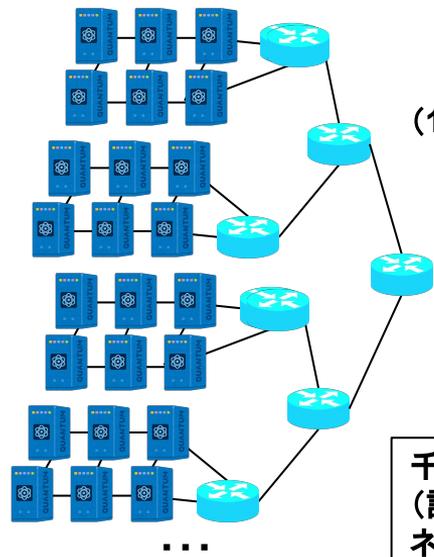


[本プロジェクト]

フルスタックでネットワーク部分を実装



技術基盤の確立
ネットワーク設計シミュレータ



誤り耐性型量子計算
(100万qubits)試算の例

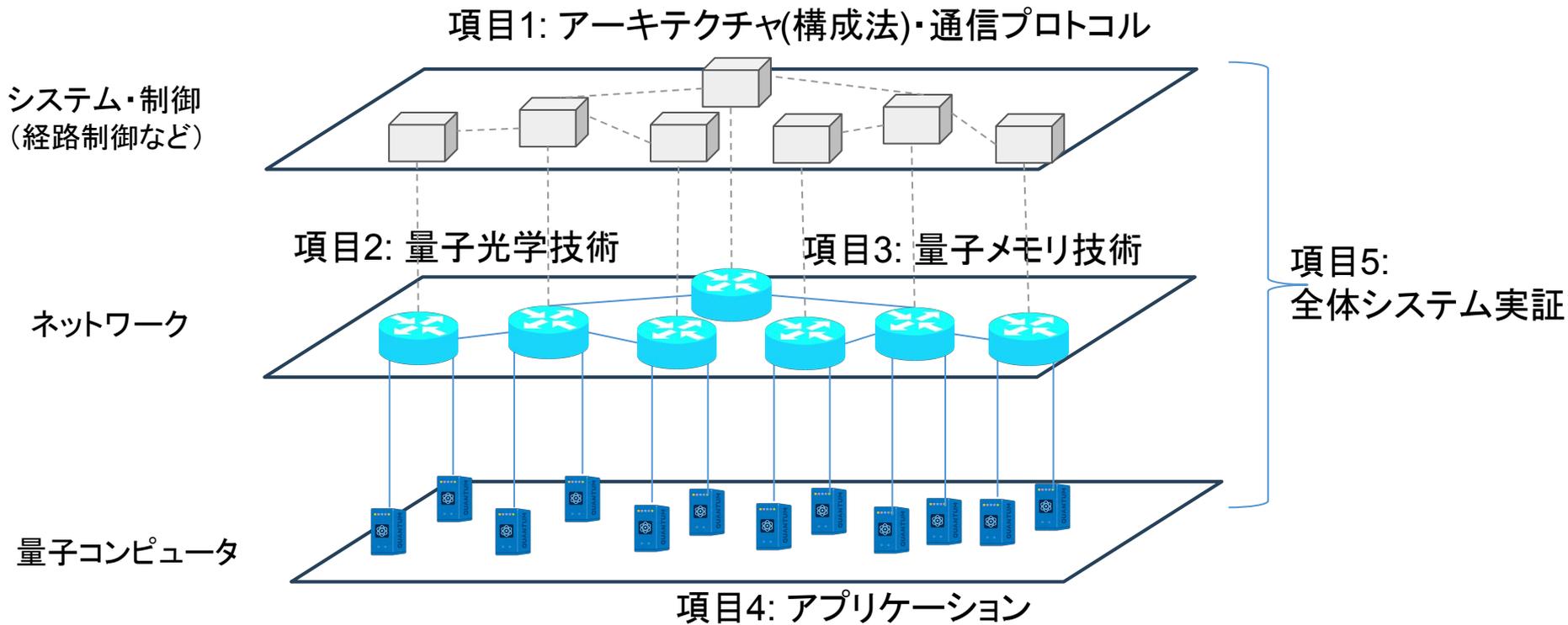
イオントラップ
100qubits×1万台

超伝導
1000qubits×1千台

千～万単位の量子計算機
(計算ノード)の
ネットワーク化の時代へ

※スーパーコンピュータ富岳の光ケーブル総延長は約900km
<https://www.r-ccs.riken.jp/fugaku/system/>

全体イメージ図



※「量子コンピュータ」も「システム・制御」を持つ必要がある

世界状況

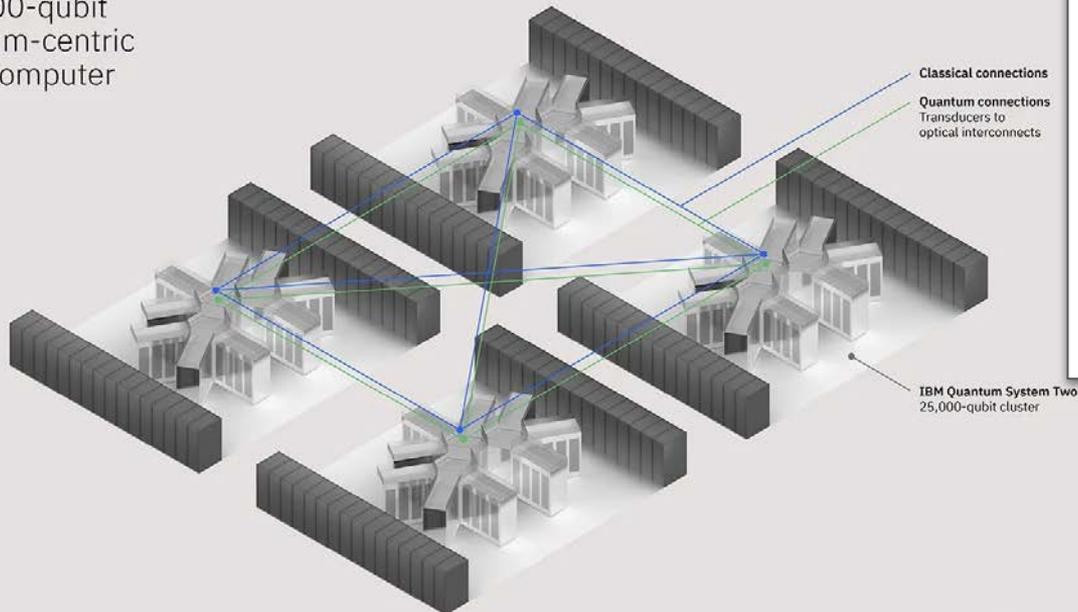
- 他国の取り組み（抜粋）
- 学会

Networked Quantum Computers: IonQ Acquires Assets of Entangled Networks.

IBMがQCの光ネットワーク化に向けた最初の構想を発表(23年5月)

100,000-qubit
quantum-centric
supercomputer

—
2033



- *Entangled Networks team joins IonQ to work on next generation networked quantum computer architectures and full-stack quantum compilers*
- *Acquisition supports IonQ's efforts to build large-scale quantum computers by enabling computation across multiple distributed quantum processors*
- *IonQ expands investment in Canada, with Entangled Networks team serving as beachhead for IonQ in Toronto*



<https://research.ibm.com/blog/100k-qubit-supercomputer>

IBM Quantum

主要学会・研究会(ネットワーク系)

- IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (IEEE Quantum Week)(永山@量子NWTラックプログラム委員)
 - 量子情報工学のトップカンファレンスへ(私見)
 - c.f. IEEE Transactions on Quantum Engineering
- IRTF (along with IETF)
 - Quantum Internet Research Group
 - 年3回開催
 - 量子ネットワークアーキテクチャに関する初 RFCが出版された(2023年3月)
 - 日本からは、Van Meter PI (慶應)・永山 PM(メルカリ・慶應)
- Workshop for Quantum Repeater Networks (WQRN)
 - 唯一の量子ネットワーク専門ワークショップ(だった)
 - 招待制
 - 隔年開催・次回2024年カナダ
- SIGCOMM
 - 量子ネットワーク専門のワークショップ QuNETを初開催(2023年) など

※物理学系: アメリカ物理学会(APS)系など、量子計算が扱われる学会・雑誌

RFC9340!!!

4年の検討を経て出版

- RFCとは: IETF/IRTFで承認されたドキュメント。
- **IETF**: 古典コンピュータ通信に関する標準化団体 (TCP/IP, http, etc.)
- **IRTF**: IETFと併催され、研究段階のコンピュータ通信技術を取り扱う
- RFC9340 は量子ネットワークに関する初めてのRFCであり、アーキテクチャ設計指針に関する情報ドキュメント。

Stream: Internet Research Task Force (IRTF)
RFC: 9340
Category: Informational
Published: January 2023
ISSN: 2070-1721
Authors: W. Kozłowski, S. Wehner, R. Van Meter, B. Rijsman, A. S. Cacciapuoti, M. Caleffi, S. Nagayama, Mercari, Inc., University of Naples Federico II, University of Naples Federico II

RFC 9340

Architectural Principles for a Quantum Internet

Abstract

The vision of a quantum internet is to enhance existing Internet technology by enabling quantum communication between any two points on Earth. To achieve this goal, a quantum network stack should be built from the ground up to account for the fundamentally new properties of quantum entanglement. The first quantum entanglement networks have been realised, but there is no practical proposal for how to organise, utilise, and manage such networks. In this document, we attempt to lay down the framework and introduce some basic architectural principles for a quantum internet. This is intended for general guidance and general interest. It is also intended to provide a foundation for discussion between physicists and network specialists. This document is a product of the Quantum Internet Research Group (QIRG).

Status of This Memo

This document is not an Internet Standards Track specification; it is published for informational purposes.

Architectural Principles for a Quantum Internet

draft-irtf-qirg-principles-11

Status [IRSG evaluation record](#) [IESG evaluation record](#) [IESG writeups](#) [Email expansions](#) [History](#)

Versions:

00 01 02 03 04 05 06 07 08 09 10 11



IETF116横浜 (IRTF QIRG)

- IETF: 古典コンピュータ通信に関する標準化団体 (TCP/IP, http, etc.)
- IRTF: IETFと併催され、研究段階のコンピュータ通信技術を取り扱う
- 116th meeting 2023/3/27-31 @横浜
 - Quantum Internet Research Group meeting in IRTF
 - Host Speaker Series (ホストの注目技術を紹介する)
"The Future & Roadmap to the Quantum Internet - Testbed Efforts in Japan -"
 - Shota Nagayama & Rodney Van Meter
 - more than 10% of participants (top classical network specialists) of IETF/IRTF joined the session.
 - Quantum Network Lab Tour to Yokohama National Univ. Horikiri-Pl.
 - <https://ietf116.jp/tour/>

物理工学EP・工学研究院
横浜国立大学 堀切研究室
Horikiri Lab@YNU

[トップページ](#) | [研究内容](#) | [研究実績](#) | [アクセス](#) | [メンバー](#) | [アルバム](#) | [リンク](#)

堀切研究室について



この研究室では、**光と物質を用いた量子技術の研究**をしています。特に量子力学と情報理論の融合で誕生した量子情報科学を用いて、新しい社会基盤技術の創出を目指しています。

キーワード：量子情報・量子通信・量子コンピュータ



NET LAB TOUR

Host Speaker Series

The Thursday 30 March Host Speaker Series talk will focus on Quantum Internet. The WIDE Project has been working on and supporting the research and development of quantum networking/quantum Internet for more than 15 years. The talk will discuss that research with particular emphasis on testbed-related activities in Japan.

MENU

TOP

永山PJの構想

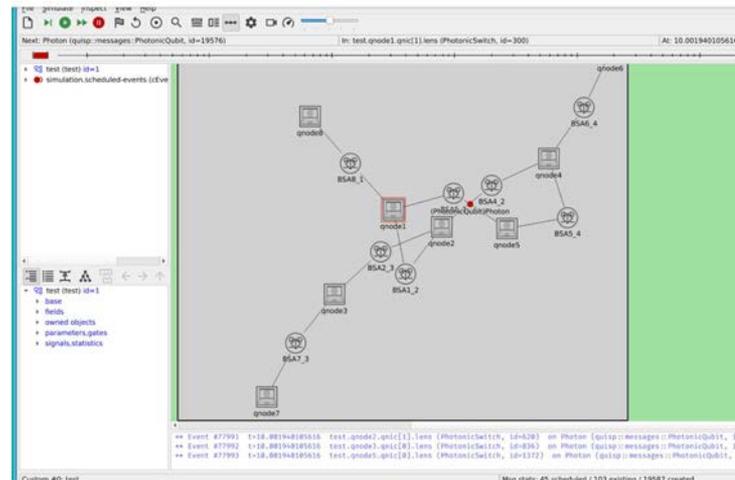
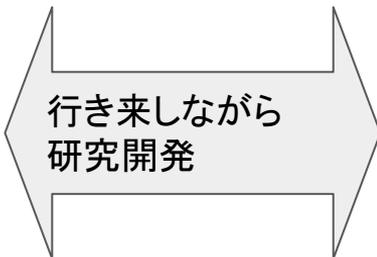
スケラブルで強靱な統合的通信システムの実現へ向けて

動作実証(原理実証→テストベッド)

- **実装**、ただし小規模ネットワーク

シミュレーション

- **大規模ネットワーク**、ただし仮想

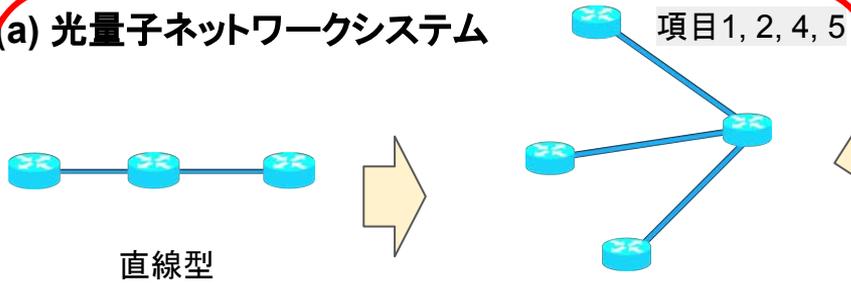


このような物理実験の
「量子ネットワークシステム」化→

本PJのマイルストーン

現在の実施課題

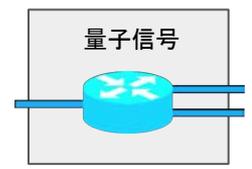
(a) 光量子ネットワークシステム



- スター型
- システム多重化

(b) 光接続可能な量子コンピュータ

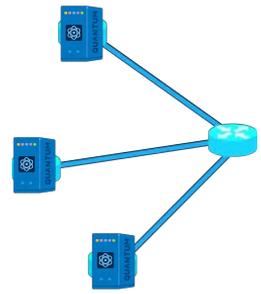
項目3



-
- バッファによる効率化
 - 量子効率向上
 - 多重化対応量子メモリ

2030年への重要課題

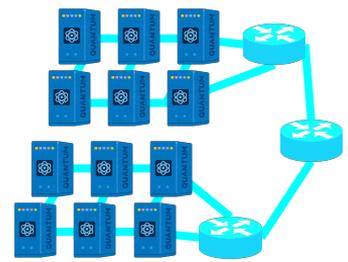
スケーラブルで強靱な統合的量子通信システム



- スター型NWの実証
- スケール検証(シミュレーション)

2040s and later

大規模QCネットワーク



小規模分散量子計算

大規模分散量子計算

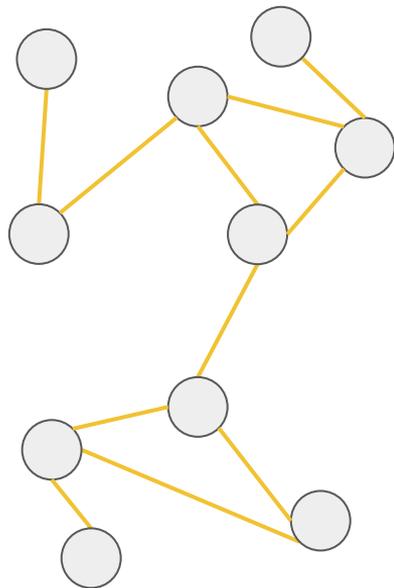
社会実装

量子ネットワークを構成する諸領域

古典ネットワーク

○ : 古典ノード

— : 古典通信路(e.g. 光ファイバー)



社会実装

インフラ化

ユースケース

情報学(理論+工学)

分散アルゴリズム

アプリケーション

計算機工学

ネットワーク理論
・グラフ理論

ソフトウェア工学
・システムソフトウェア
・分散システム
・セキュリティ

通信理論/通信工学
・符号

ネットワーク工学
・プロトコルスタック

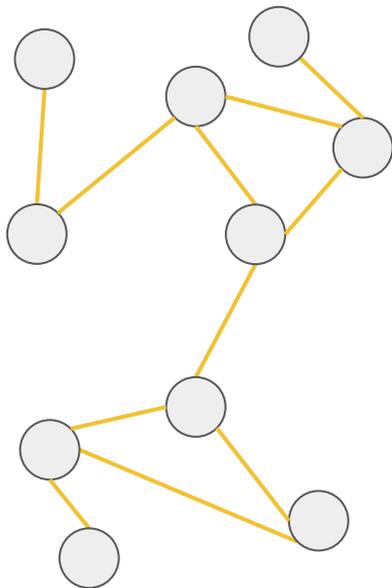
古典力学

エレクトロニクス
光学
制御工学
物性 etc.

量子ネットワーク

○ : 量子ノード

— : 量子通信路 (e.g. 光ファイバー)



社会実装

インフラ化

ユースケース

情報学(理論+工学)

分散アルゴリズム

アプリケーション

計算機工学

ネットワーク理論
・グラフ理論

ソフトウェア工学
・システムソフトウェア
・分散システム
・セキュリティ

通信理論/通信工学
・符号

ネットワーク工学
・プロトコルスタック

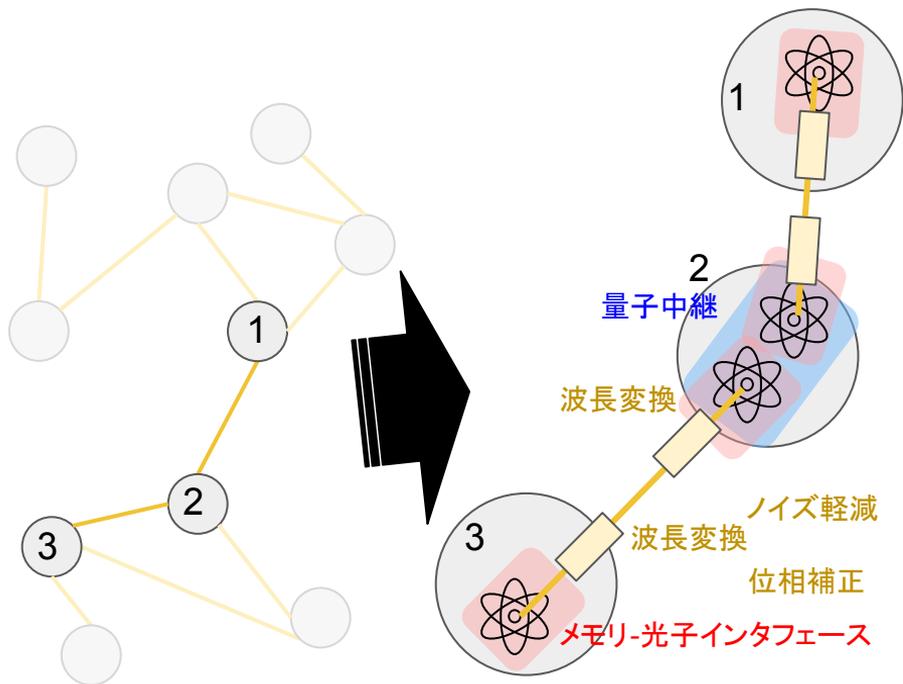
量子力学・光学 (理論+工学)

量子エレクトロニクス、量子デバイス、
量子光学、光物性、非線形光学
量子制御工学、物性 etc.

量子ネットワーク

○ : 量子ノード

— : 量子通信路 (e.g. 光ファイバー)



社会実装

インフラ化

ユースケース

MOONSHOT
RESEARCH & DEVELOPMENT PROGRAM

情報学(理論+工学)

分散アルゴリズム

アプリケーション

計算機工学

ソフトウェア工学
・システムソフトウェア
・セキュリティ

ネットワーク理論
・グラフ理論

ソフトウェア工学
・システムソフトウェア
・セキュリティ

通信理論/通信工学
・符号

直接接続・数台の接続で
特に重要

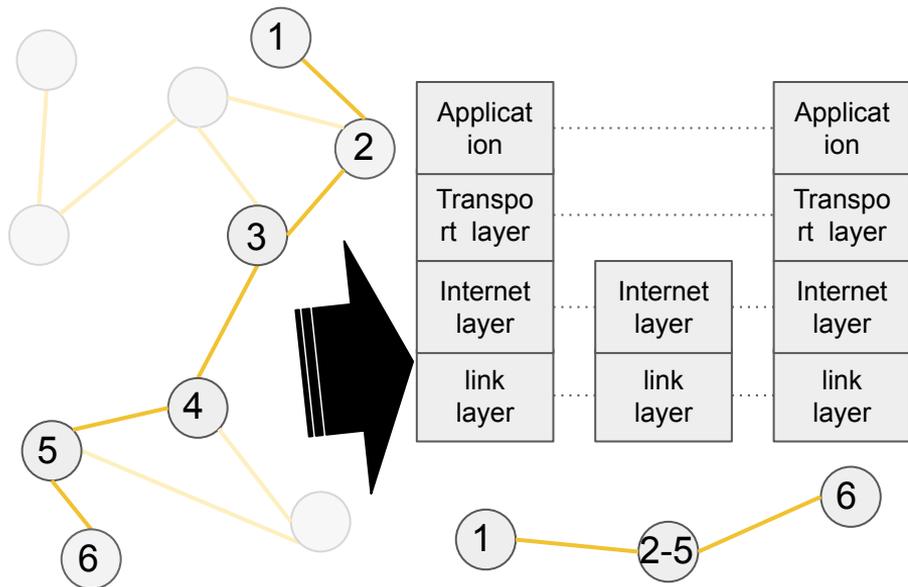
量子力学・光学
(理論+工学)

※ 当然、必要
量子エレクトロニクス、量子デバイス、
量子光学、光物性、非線形光学
量子制御工学、物性 etc.

量子ネットワーク

○ : 量子ノード

— : 量子通信路 (e.g. 光ファイバー)



社会実装

インフラ化

数十～数万以上のコンピュータをつなげる際に鍵となる

情報学(理論+工学)

特に、アーキテクチャ(設計)

分散アルゴリズム

アプリケーション

計算機工学

ネットワーク理論
・グラフ理論

ソフトウェア工学
・システムソフトウェア
・分散システム
・セキュリティ

通信理論/通信工学
・符号

ネットワーク工学
・プロトコルスタック

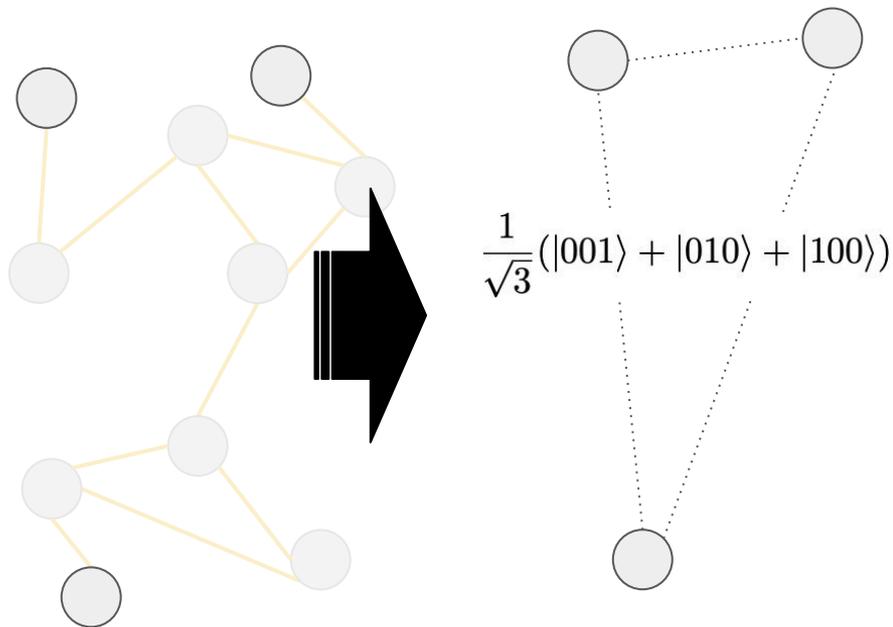
量子力学
(理論+工学)

量子エレクトロニクス、量子デバイス、
量子光学、光物性、非線形光学
量子制御工学、物性 etc.

量子ネットワーク

○ : 量子ノード

— : 量子通信路 (e.g. 光ファイバー)



社会実装

インフラ化

ユースケース



MOONSHOT
RESEARCH & DEVELOPMENT PROGRAM

情報学(理論+工学)

量子ネットワーク・分散量子コンピュータの目的

分散アルゴリズム

アプリケーション

計算機工学

ソフトウェア工学

・システムソフトウェア

・分散システム

・セキュリティ

ネットワーク理論

・グラフ理論

通信理論/通信工学

・符号

ネットワーク工学

・プロトコルスタック

量子力学 (理論+工学)

量子エレクトロニクス、量子デバイス、

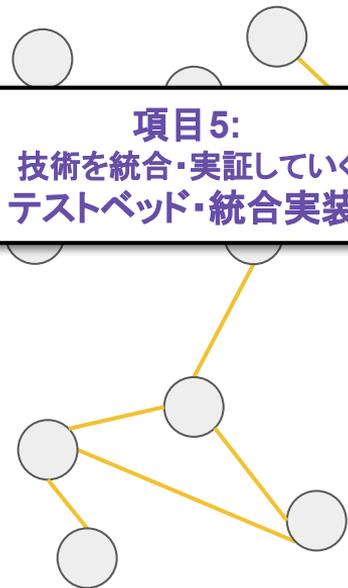
量子光学、光物性、非線形光学

量子制御工学、物性 etc.

量子ネットワーク

○ : 量子ノード

— : 量子通信路 (e.g. 光ファイバー)



項目5:
技術を統合・実証していく
テストベッド・統合実装

項目4:
量子情報の分散環境が可能とする
分散量子アプリ

項目1: 強靱で大規模な通信網を実現する新しいネットワークアーキテクチャ・プロトコル

項目3: 量子信号の中継・変換を実現する
量子メモリ・量子中継

項目2: 量子光の精緻な制御を可能にする
量子光通信技術

社会実装

インフラ化

ユースケース

情報学(理論+工学)

分散アルゴリズム

アプリケーション

計算機工学

ネットワーク理論
・グラフ理論

ソフトウェア工学
・システムソフトウェア
・分散システム
・セキュリティ

通信理論/通信工学
・符号

ネットワーク工学
・プロトコルスタック

量子力学・光学 (理論+工学)

量子エレクトロニクス、量子デバイス、
量子光学、光物性、非線形光学
量子制御工学、物性 etc.

永山PJを構成する研究項目と これまでの成果（抜粋）

量子ネットワーク

○ : 量子ノード

— : 量子通信路 (e.g. 光ファイバー)



項目5:
技術を統合・実証していく
テストベッド・統合実装

項目4:
量子情報の分散環境が可能とする
分散量子アプリ

項目1: 強靱で大規模な通信網を実現する新しいネットワークアーキテクチャ・プロトコル

項目3: 量子信号の中継・変換を実現する量子メモリ・量子中継

項目2: 量子光の精緻な制御を可能にする量子光通信技術

社会実装

インフラ化

ユースケース

情報学(理論+工学)

分散アルゴリズム

アプリケーション

計算機工学

ネットワーク理論
・グラフ理論

ソフトウェア工学
・システムソフトウェア
・分散システム
・セキュリティ

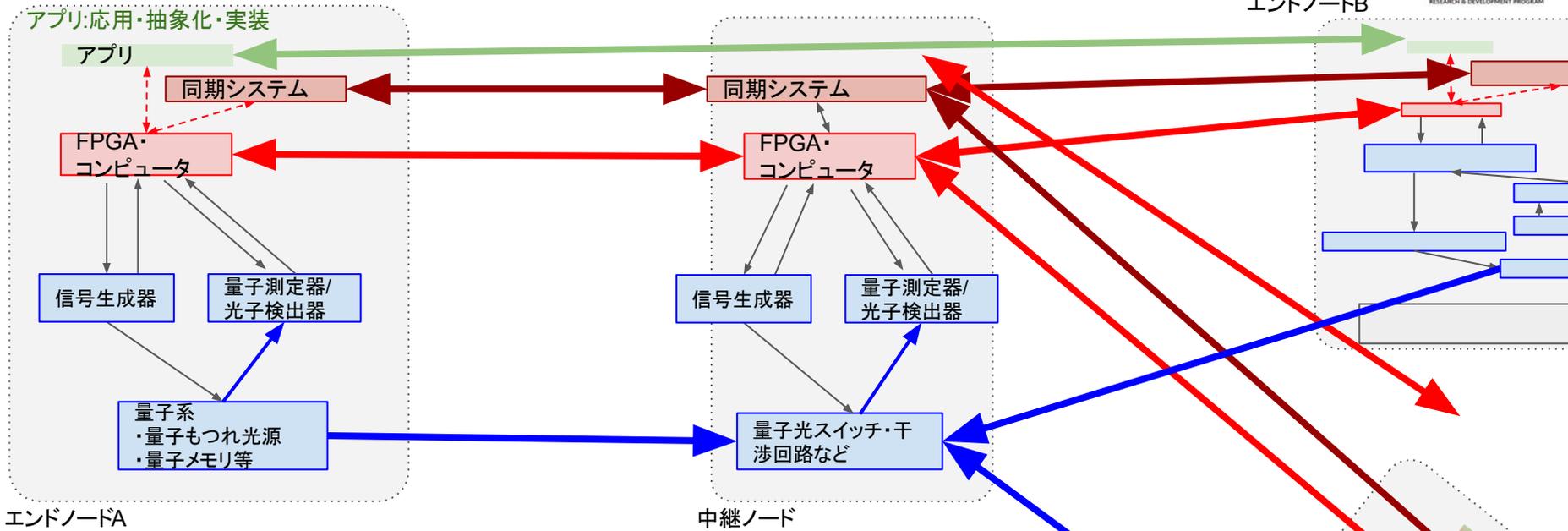
通信理論/通信工学
・符号

ネットワーク工学
・プロトコルスタック

量子力学・光学 (理論+工学)

量子エレクトロニクス、量子デバイス、
量子光学、光物性、非線形光学
量子制御工学、物性 etc.

完成形イメージ図



ネットワークシステムソフトウェア
ネットワークシステムハードウェア
(ネットシステム)
量子ハードウェア/量子制御装置(ハードウェア)

課題1: 光技術による量子通信ネットワークの
統合的実証

慶應義塾大学 永山翔太



課題2: 量子ネットワークシステム実証実験
のためのイオントラップ量子ノードの開発

大阪大学 長田有登



タイミング管理

10 ⁻¹⁵ (fs)	10 ⁻¹² (ps)	10 ⁻⁹ (ns)	10 ⁻⁶ (us)	10 ⁻³ (ms)	second	minutes+	
				H. 分散量子コンピュータのアプリ・タスク			Application Tasks
					I. バックグラウンドタスク		
				G. 緊急だが同期に依存しないタスク			Software Tasks
				F. 事前設定されたイベント駆動タスク			
				E. 光スイッチ 操作			Hardware Tasks
		D. 測定基底の Passive 操作		D. 測定基底のActive 操作			
		C. 測定器のオンオフ・リカバリタイム					
	B. 光子波束のオーバーラップ						Quantum Optical Path
A. 光子の位相制御							

量子ネットワークテストベッド

- 川崎市のインキュベーション施設 (KBIC) に実験室 (99平米) を新規に立ち上げ
- 空調、電源、暗室環境などひと通り整備
- 光学定盤を3台設置
- 基本設計 Done
- パルスレーザー、光子検出器、計数システムなど、主要なハードウェアを選定、調達
- 量子光システム立ち上げ開始



2022年11月 (PJ開始)



光学定盤1台目の搬入



量子もつれ光源実験系
(光学装置、レーザー、SSPDなど)

量子ネットワークテストベッド(光量子ネットワーク)@項目5課題1

スケラブルで強靱な統合的通信システムの実現へ向けて

動作実証 (原理実証→テストベッド)

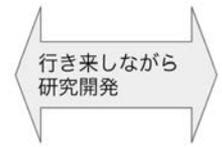
- **実装**、ただし小規模ネットワーク

シミュレーション

- **大規模ネットワーク**、ただし仮想



このような物理実験の「量子ネットワークシステム」化→



行き来しながら
研究開発



光もつれ接続装置



光スイッチ



通信システム化したエンドノードを3つ開発し、ルーティングを行う中継ノードも開発し、接続する

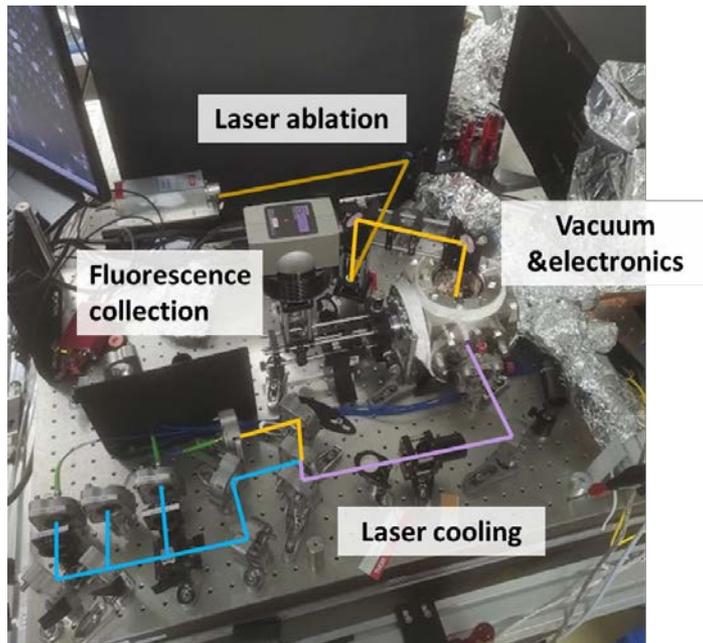
- 項目5課題1 永山 with 量子HW(量子光学系)
- 項目2課題1 生田PI
 - 項目2課題2 武岡PI
 - 項目3課題1 堀切PI
 - 古典システム・ソフトウェア
 - 項目1課題2 大野PI
 - 項目1課題3 佐々木PI
 - 項目1課題5 Van Meter PI
 - 検証
 - 項目4課題1 添田PI

量子ネットワークテストベッド(イオン接続)@項目5課題2

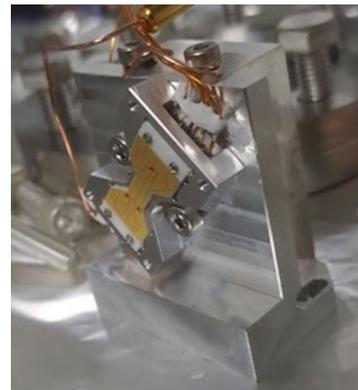
ストロンチウム, 422nm



A. Osada
Osaka U.



光接続可能な量子ノード(イオントラップ)

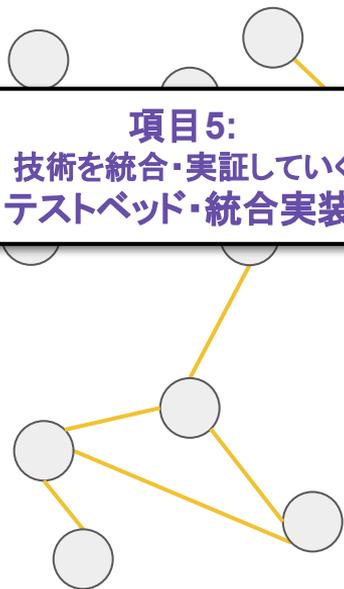


ion-trap chip

量子ネットワーク

○ : 量子ノード

— : 量子通信路 (e.g. 光ファイバー)



項目5:
技術を統合・実証していく
テストベッド・統合実装

項目4:
量子情報の分散環境が可能とする
分散量子アプリ

項目1: 強靱で大規模な通信網を実現する新しいネットワークアーキテクチャ・プロトコル

項目3: 量子信号の中継・変換を実現する量子メモリ・量子中継

項目2: 量子光の精緻な制御を可能にする量子光通信技術

社会実装

インフラ化

ユースケース

情報学(理論+工学)

分散アルゴリズム

アプリケーション

計算機工学

ネットワーク理論
・グラフ理論

ソフトウェア工学
・システムソフトウェア
・分散システム
・セキュリティ

通信理論/通信工学
・符号

ネットワーク工学
・プロトコルスタック

量子力学・光学 (理論+工学)

量子エレクトロニクス、量子デバイス、
量子光学、光物性、非線形光学
量子制御工学、物性 etc.

項目2: 量子光の精緻な制御を可能にする量子光通信技術



大阪大学
OSAKA UNIVERSITY



MOONSHOT
RESEARCH & DEVELOPMENT PROGRAM

YNU

LQUOM

NW中核課題: 2光子干渉(偏光 qubit→イオン等)

課題1: 量子光通信の高性能化技術の開発

Rikizo Ikuta, Osaka Univ.

QC接続: 位相同期(1光子干渉で必要)

課題3: 量子光通信の位相同期・安定化技術の開発

Daisuke Akamatsu, Yokohama National Univ.

課題4: 希土類量子メモリと量子光通信との光インターフェースの開発

Kazuya Niizeki, LQUOM Corporation

QC接続: 量子メモリ対応波長との高効率接続

希土類量子メモリ光接続

Japanese Journal of Applied Physics 61 (8) 088003 (2022)
Optics Express 29 (25), 41522-41533 (2021)
Japanese Journal of Applied Physics 60, 122001 (2021)
Communications Physics, 3, 138 (2020)
Journal of the Optical Society of America B 35, 2023,(2018)
Applied Optics 57 (20) 5628-5634,(2018)
Japanese Journal of Applied Physics 57, 062801,(2018)

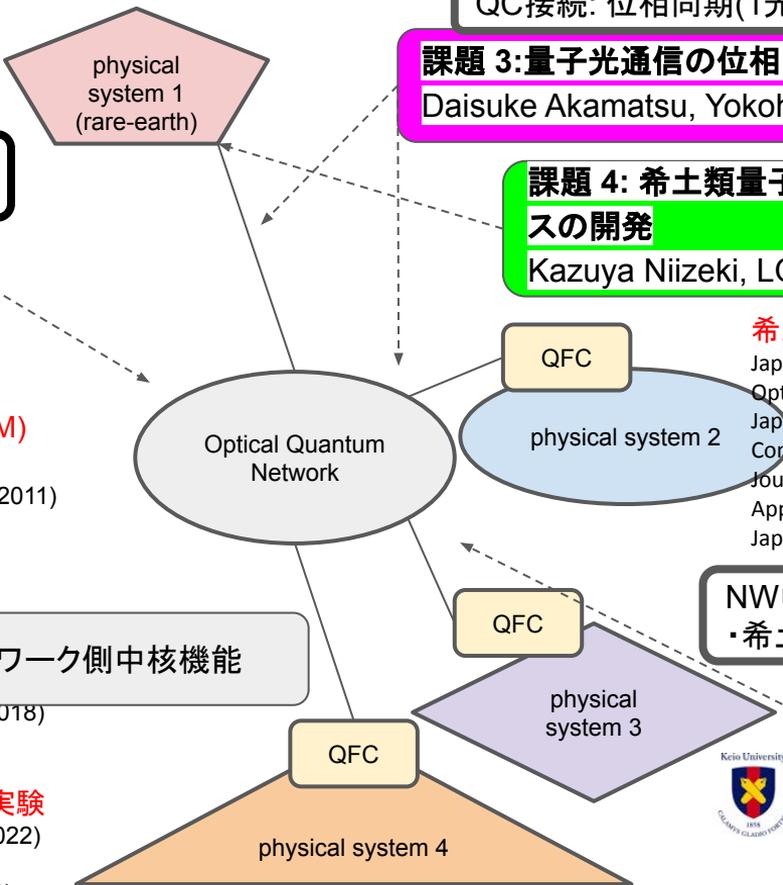
NW中核課題: 1光子干渉(Fock, time-bin→超伝導・希土類等)

課題2: 損失に強い量子光通信技術の研究開発 Masahiro Takeoka, Keio Univ.

通信容量とトレードオフ

Phys. Rev. Lett., 119, 150501 (2017).
Nat. Commun. 5: 5235 (2014).

もつれ生成のための高速 HOM効果
Opt. Express, 29, 37150 (2021).



ネットワーク側中核機能



Keio University
KEIO UNIVERSITY

Background results

(Prof. Ikuta, also with Yamamoto-PM)

高忠実度の量子もつれ配送

Physical Review Letters 106 (11), 110503 (2011)
Scientific Reports 7 (1), 4819 (2017)
npj Quantum Information 6 (1), 44 (2020)
Physical Review A 93 (5), 052307 (2016)

量子波長変換

理論研究&実験研究

Nature communications 9 (1), 199 (2018)
Physical review letters 120 (20), 203601 (2018)
Nature Communications 2, 537 (2011)
Physical Review A 87 (1), 010301 (2013)

基本かつ機能的な量子ルーティング実験

Physical Review Applied 17 (3), 034012 (2022)
Nature communications 10 (1), 378 (2019)
Optics express 25 (11), 12069-12080 (2018)
New Journal of Physics 16 (2), 023005 (2014)



高効率な多量子もつれ状態の共有

Efficient Dicke state distribution in a network of lossy channels

W state – single photon state

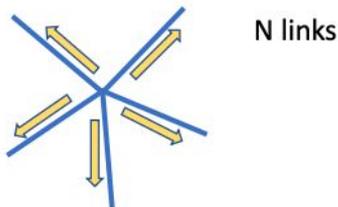
$$|W_3\rangle = \frac{1}{\sqrt{3}}(|100\rangle + |010\rangle + |001\rangle)$$

- 問題: 多量子もつれ (W状態/Dicke状態等) を量子コンピュータ間に分配すると指数的に効率が低下
- 提案: 1光子干渉を応用した手法 (squeezed vacuum for the input state: less effects from losses.)
- 結果: 高効率化することを理論的に確認

Direct transmission method

Polarization states W

$$|W_3\rangle = \frac{1}{\sqrt{3}}(|hvv\rangle + |vhv\rangle + |vvh\rangle)$$



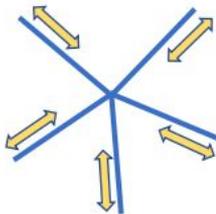
Generation rate $\sim T^N$

T – power transmittance of one link

Repeater-like method

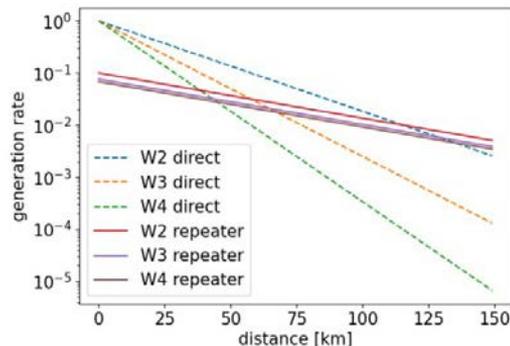
$$|\psi\rangle_{X_i X'_i} = a|00\rangle_{X_i X'_i} + b|11\rangle_{X_i X'_i}$$

$$a \gg b$$



Generation rate $\sim T$

W states in a star network with loss

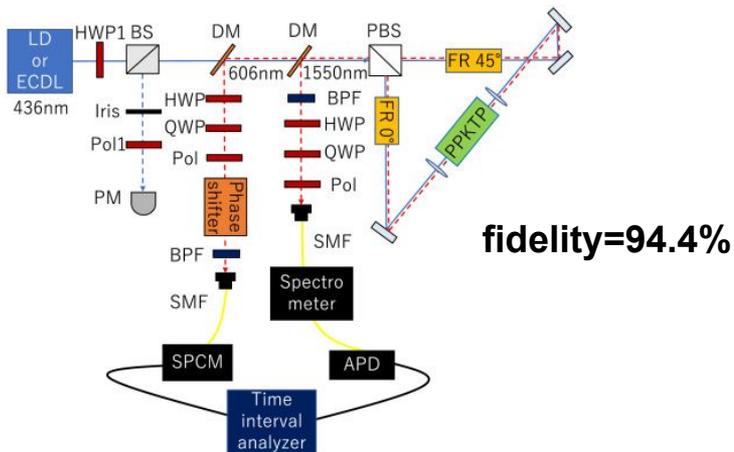


Comparison repeater-like scheme with the direct method

Efficient Dicke-state distribution in a network of lossy channels. W. Roga, R. Ikuta, T. Horikiri, M. Takeoka. Phys. Rev. A 108, 012612

非縮退量子もつれ生成

606nm-1550nm entanglement generation



- 1550nm-606nm もつれ光子対生成
- 1550: 通信波長
- 606: Pr:YSO (希土類量子メモリ) 波長
- Pr:YSO メモリと通信波長の効率的な接続に発展する成果

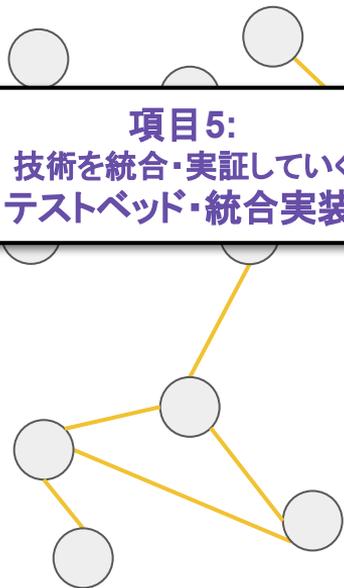
Sagnac interferometer-type nondegenerate polarization entangled two-photon source with a Fresnel rhomb.
 Aizawa, [Niizeki](#), ..., [Horikiri](#), *et al.* Applied Optics 62 (9) 2273-2277 (2023)

Comparison of the Current Study with Previous Studies

Year	Reference	Photon Wave Length (nm)	Fidelity	Visibility
2008	[16]	810,1550	-	91%
2009	[14]	810,1550	98.2%	-
2013	[15]	810,1550	96.5% ^a	-
2016	[10]	894,1313	75.3%	70.2%
2022	This work	606,1550	94.4%	-

量子ネットワーク

○ : 量子ノード
— : 量子通信路 (e.g. 光ファイバー)



項目5:
技術を統合・実証していく
テストベッド・統合実装

項目4:
量子情報の分散環境が可能とする
分散量子アプリ

項目1: 強靱で大規模な通信網を実現する新しいネットワークアーキテクチャ・プロトコル

項目3: 量子信号の中継・変換を実現する
量子メモリ・量子中継

項目2: 量子光の精緻な制御を可能にする
量子光通信技術

社会実装

インフラ化

ユースケース

情報学(理論+工学)

分散アルゴリズム

アプリケーション

計算機工学

ネットワーク理論
・グラフ理論

ソフトウェア工学
・システムソフトウェア
・分散システム
・セキュリティ

通信理論/通信工学
・符号

ネットワーク工学
・プロトコルスタック

量子力学・光学 (理論+工学)

量子エレクトロニクス、量子デバイス、
量子光学、光物性、非線形光学
量子制御工学、物性 etc.

項目3:量子信号の中継・変換を実現する量子メモリ・量子中継

課題1: 量子中継ネットワークに向けた多重化量子メモリ開発
Tomoyuki Horikiri, Yokohama National Univ.

課題2: 中継用量子メモリ光源安定化技術の開発
Hong Feng Lei, Yokohama National Univ.

**課題3: スピン波によるもつれ光子発生
の確実性向上に関する研究開発**
Haruka Tanji, The Univ. of Electro-Communications

高信頼もつれ光子対バッファ
Applied Physics B 116, 821 (2014)
Science 341, 768 (2013)
Science 333, 1266 (2011)

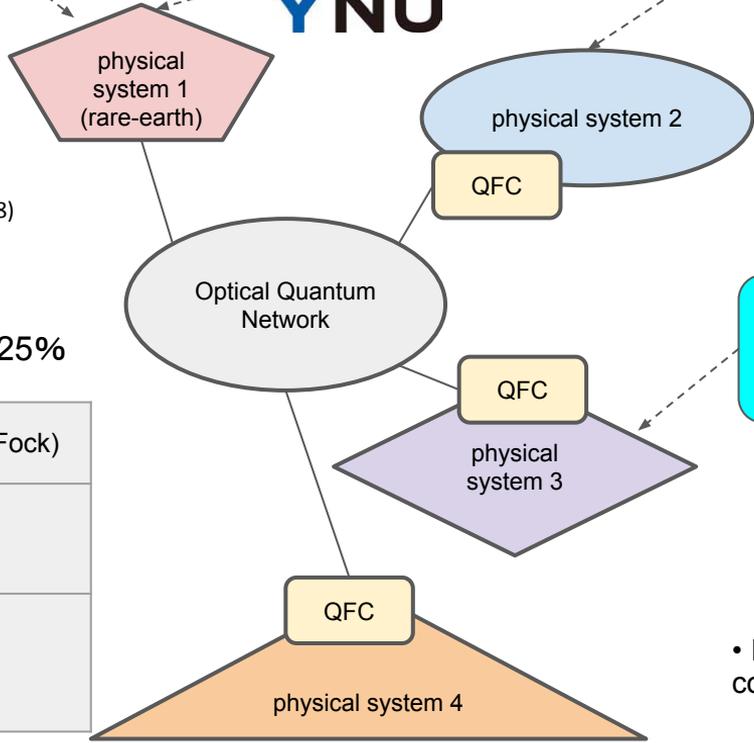


課題4: 量子メカニカルメモリの開発
Rekishu Yamazaki, International Christian Univ.
Yuya Yamaguchi, NICT
Ryo Sasaki, RIKEN

量子メカメモリ
RY et al., Phys. Rev. A 101, 053839 (2020)
K. Takeda, RY et al., Optica 5, 152 (2018)
A. Noguchi, R.Y. et al., Nat. Comm. 11, 1183 (2020)

$$\hat{H} = \hbar g_0 (\hat{a}\hat{a}^\dagger\hat{b} + \hat{a}\hat{a}^\dagger\hat{b}^\dagger)$$

- Interaction is parametric = wavelength conversion is inherent
→ Wide frequency range
Memory frequency, write/read frequency



Background results

希土類量子メモリ

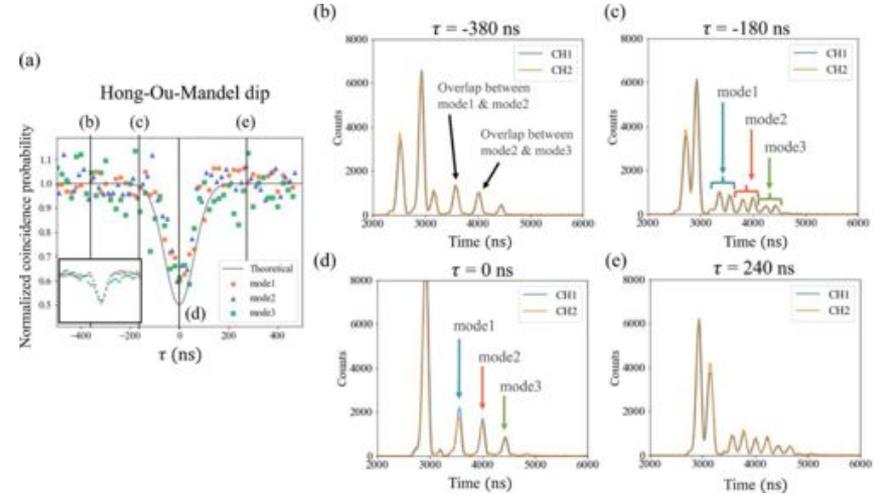
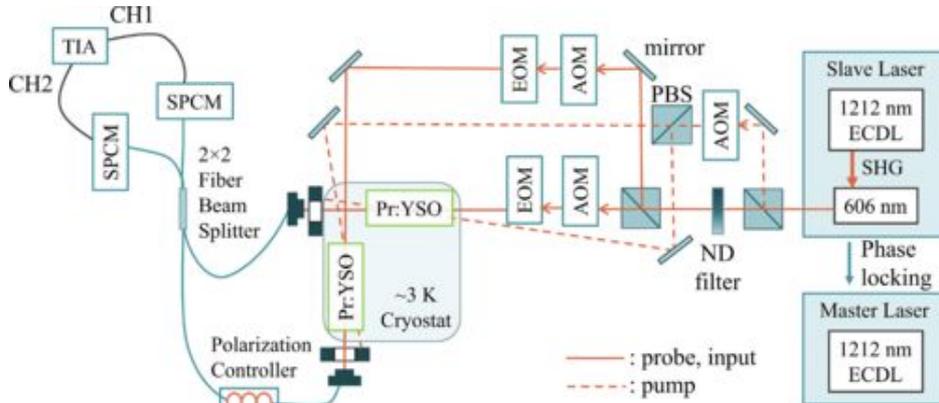
Japanese Journal of Applied Physics 61 (8) 088003 (2022)
Optics Express 29 (25), 41522-41533 (2021)
Japanese Journal of Applied Physics 60, 122001 (2021)
Communications Physics.,3, 138 (2020)
Journal of the Optical Society of America B 35, 2023,(2018)
Applied Optics 57 (20) 5628-5634,(2018)
Japanese Journal of Applied Physics 57, 062801,(2018)

Our lifetime for now: 50μs
store/load quantum efficiency: about 25%

	2光子干渉(偏光)	1光子干渉(Fock)
光 swap	冷却集団原子	希土類
メモリ swap	イオン→イオン連携(項目5)	超伝導

希土類量子メモリの波長多重化の実証

Frequency-multiplexed Hong-Ou-Mandel interference, after store-and-load in rare-earth quantum memory



- 3モードの光子を希土類量子メモリ (Pr:YSO) に「書き込み」と「読み出し」(3波長多重化)
- 2つのメモリから読み出した光子 (弱い光) 2つをベル状態測定 (Hong-Ou-Mandel 干渉)
- 可視度 40%–42% を確認 (理論限界 50%)

Frequency reference lines at telecom wavelength

Eur. Phys. J. D (2023)77:140
<https://doi.org/10.1140/epjd/s10053-023-00712-7>

THE EUROPEAN
PHYSICAL JOURNAL D

Regular Article – Molecular Physics and Chemical Physics

Rotation dependence of $v' = 44$ excited-state hyperfine constants obtained via precise measurements of the hyperfine structures of $^{127}\text{I}_2$ lines near 514 nm

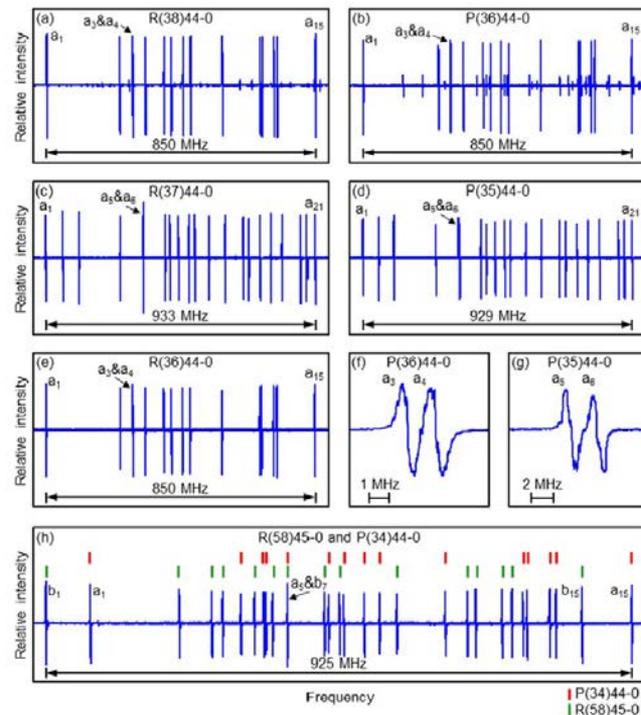
Mayuko Yoshiki, Shogo Matsunaga, Kohei Ikeda, Daisuke Akamatsu, and Feng-Lei Hong^{a*}

Department of Physics, Graduate School of Engineering Science, Yokohama National University, 79-5 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama 240-8501, Japan

Received 5 March 2023 / Accepted 21 June 2023

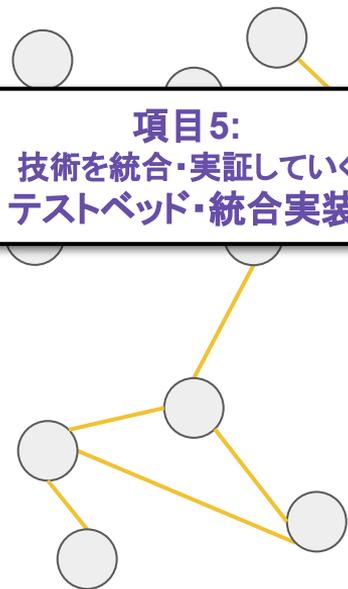
© The Author(s), under exclusive licence to EDP Sciences, SIF and Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2023

Abstract. Frequency-stabilized lasers are of considerable interest not only for the implementation of time and length standards but also as tools to study atoms and molecules. The absolute frequencies and hyperfine structures of the R(38)44-0, P(36)44-0, R(37)44-0, P(35)44-0, R(36)44-0, P(34)44-0, and R(58)45-0 lines of molecular iodine ($^{127}\text{I}_2$) at 514 nm were measured in this study via modulation transfer spectroscopy. The hyperfine splittings were fitted to a four-term Hamiltonian with an uncertainty of approximately 1 kHz to obtain high-precision hyperfine constants. The rotation dependence of the excited-state (B state, $v' = 44$) hyperfine constants was determined using the fitted hyperfine constants. Notably, 103 hyperfine transitions were observed, with an uncertainty of 5.6 kHz (a fractional uncertainty of 9.6×10^{-12}), thereby providing new optical frequency references for telecommunication and other applications.



量子ネットワーク

○ : 量子ノード
— : 量子通信路 (e.g. 光ファイバー)



項目5:
技術を統合・実証していく
テストベッド・統合実装

項目4:
量子情報の分散環境が可能とする
分散量子アプリ

項目1: 強靱で大規模な通信網を実現する新しいネットワークアーキテクチャ・プロトコル

項目3: 量子信号の中継・変換を実現する
量子メモリ・量子中継

項目2: 量子光の精緻な制御を可能にする
量子光通信技術

社会実装

インフラ化

ユースケース

情報学(理論+工学)

分散アルゴリズム

アプリケーション

計算機工学

ネットワーク理論
・グラフ理論

ソフトウェア工学
・システムソフトウェア
・分散システム
・セキュリティ

通信理論/通信工学
・符号

ネットワーク工学
・プロトコルスタック

量子力学・光学 (理論+工学)

量子エレクトロニクス、量子デバイス、
量子光学、光物性、非線形光学
量子制御工学、物性 etc.

項目1:量子ネットワークアーキテクチャ・プロトコル

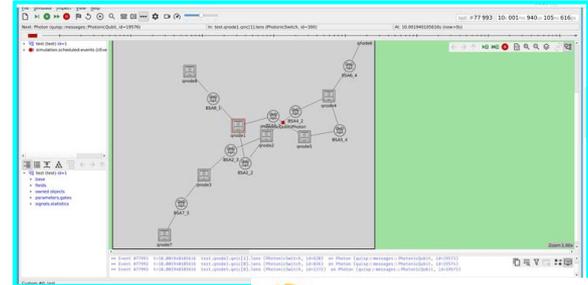
アーキテクチャ・プロトコル課題

- NWアーキ・デザインとプロトコルスタック
 - NW自体の動作・設計
 - NWへの量子コン接続
 - NW自体の評価

- ノード設計と実装
 - 量子NWシステム(項目2連携)
 - 古典NWシステム
 - モジュールの同定・インターフェース設計
 - HW研究開発目標値算出

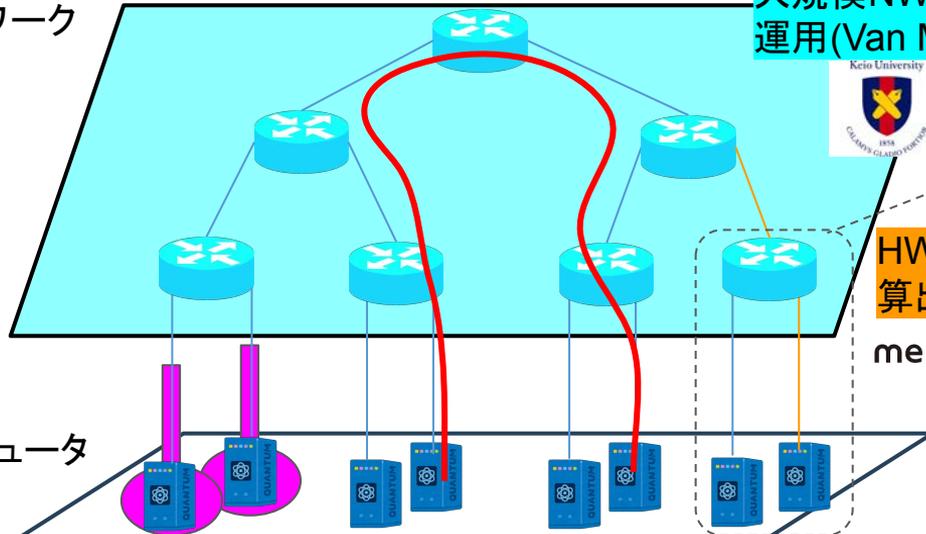
NWシミュレーション

Argonne/Chicago大/Sorbonne大/Mahidol大 と連携



ネットワーク

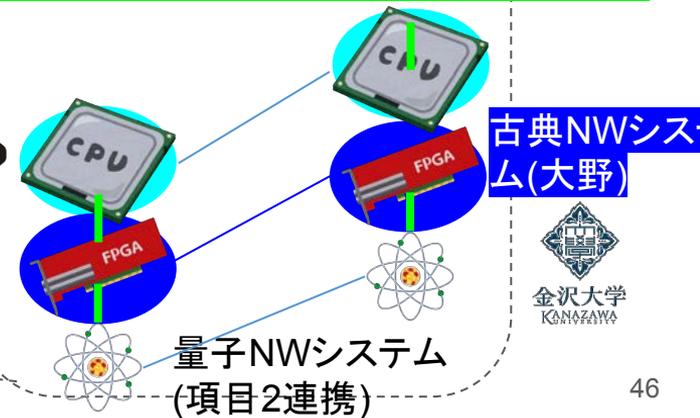
大規模NWプロトコル/
運用 (Van Meter)



HW目標値
算出 (永山)

mercari R4D

モジュール間インターフェース設計 (佐々木)



古典NWシステム (大野)



金沢大学
KANAZAWA

量子NWシステム
(項目2連携)

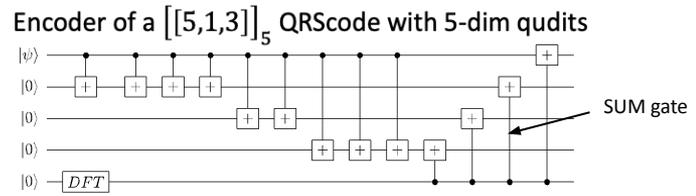
エッジアーキテクチャ検討 (根本)

量子コンピュータ間
通信評価 (Elkouss)





Quantum Reed-Solomon Codeの符号化におけるリソース低減化について

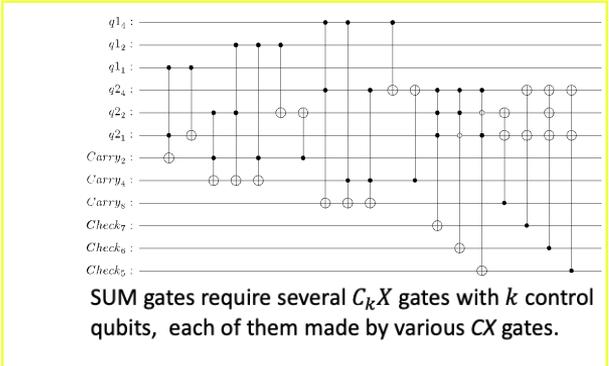


The SUM gate (generalized CX gate) is given

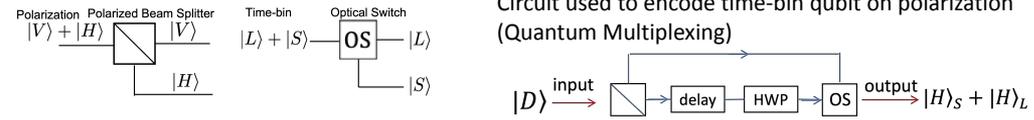
by: $SUM(|a\rangle|b\rangle) = |a\rangle|a + b \text{ mod } d\rangle$

Quditの符号化をqubitを用いて行うのが自然であるが、ゲートの数大幅に増えてしまう。

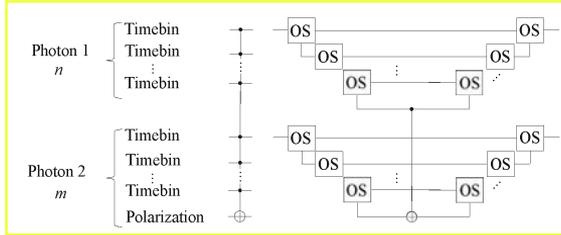
例) 5次元のquditのsum gateをqubitで符号化するためのゲート列



Quantum multiplexingを用いることで、光子がもつ多様な自由度を利用して、CXゲートの数を減らす。例えば、偏光とタイムビンの両方を用いる時は、次のような光学素子でmultiplexed光子を作ることができる：



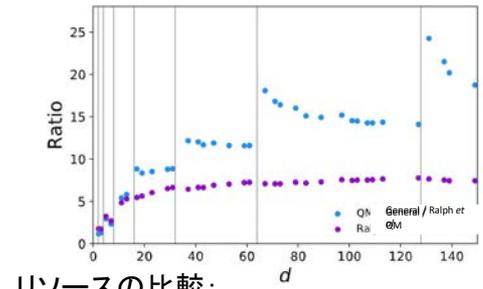
Quantum multiplexing allows to realize C_kX gate using only one CX gate



- The time-bin DOFs are splitted into spatial modes through a series of OSs.
- A single CX gate is applied between the relevant modes of photon 1 and photon 2.
- The OSs recombine the time-bin modes into a single spatial mode.

重要な点

- CXゲートの低減化の度合いを通常の方法との比で数値的に比較すると、従来の Quantum multiplexingの方法(図中紫点)よりも、大幅に低減化が可能(図中青点)であることが示された。
- Multiplexingを行うための実装は、通常の光学素子で行うことができ、オーバーヘッドは少ない。
- 損失誤りでは計算量はランダムパウリの場合よりも抑えられる。

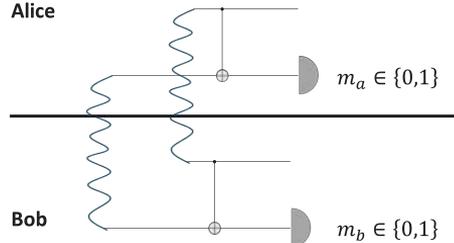


リソースの比較:
Ratioの数が多いほどリソースは低減

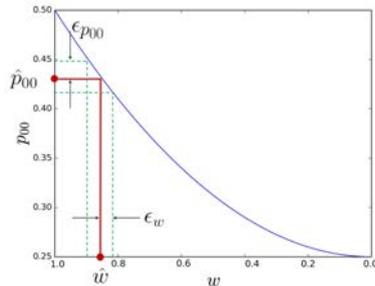
エンタングルメント蒸留からの結果によるノイズの推定 (Evaluation tool of quantum link)

エンタングルメント蒸留からの結果によるノイズの推定

- 近似的なエンタングルメントは、ノイズが多く、低いレートで生成される。
- エンタングルメント蒸留: エンタングルメントの品質を向上する手法



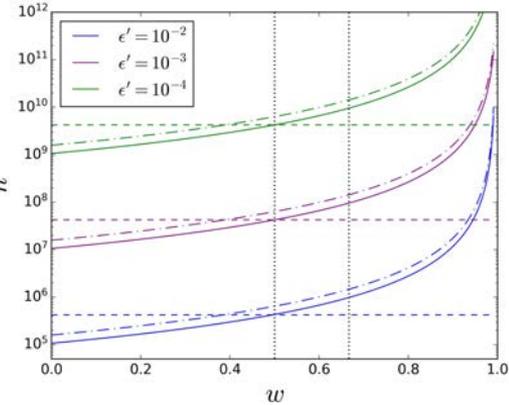
蒸留プロトコルの成功確率、 p_{00} は、基礎となる状態(下記のWerner状態を参照)に関連しており、ノイズの存在下でもこの関係は保持される。



本研究: 蒸留プロトコルの成否から、ノイズの存在下でのWerner係数を推定するためのアルゴリズムの方法を開発。

Algorithm 1 Experiment for estimation of Werner parameter.

- Input:**
 number of samples N
 estimation precision ϵ_w
- Output:**
 failure probability δ
 estimated Werner parameter \hat{w}
- 1: $n_{\text{count}} \leftarrow 0$
 - 2: **for** $n = 1$ to N **do**
 - 3: Prepare two copies of the unknown state $\rho_{w,c}$ and $\rho_{w,t}$
 - 4: Alice and Bob locally perform XOR-operation
 - 5: $(Z_A, Z_B) \leftarrow M_Z^{\otimes 2} \rho_{w,t}$ ▷ Each measures their half of $\rho_{w,t}$ in the Z-basis
 - 6: **if** $Z_A = +1$ and $Z_B = +1$ **then**
 - 7: $n_{\text{count}} \leftarrow n_{\text{count}} + 1$
 - 8: $\hat{p}_{00} \leftarrow n_{\text{count}}/N$
 - 9: $\hat{w} \leftarrow 1 - \sqrt{4\hat{p}_{00} - 1}$
 (Calculate the extreme values around \hat{w})
 - 10: $w_p \leftarrow \hat{w} + \epsilon_w$
 - 11: $w_m \leftarrow \hat{w} - \epsilon_w$
 (Calculate the extreme values around p_{00})
 - 12: $p_{00p} \leftarrow \frac{1}{4}(2 - 2w_p + w_p^2)$
 - 13: $p_{00m} \leftarrow \frac{1}{4}(2 - 2w_m + w_m^2)$
 (Calculate precision around p_{00})
 - 14: $\epsilon \leftarrow \max(|\hat{p}_{00} - p_{00p}|, |\hat{p}_{00} - p_{00m}|)$
 - 15: $\delta \leftarrow \exp(-2N\epsilon^2)$.
 - 16: **Output** δ, \hat{w}



3つの異なる精度目標に対するWerner係数の推定方法を比較するグラフ。これらの方法は、蒸留ベース(実線は実線、ノイズありは点線)とトモグラフィ(破線)です。新しい蒸留ベースの方法で必要なサンプル数は、関連するパラメータ範囲においてトモグラフィよりも優れている。

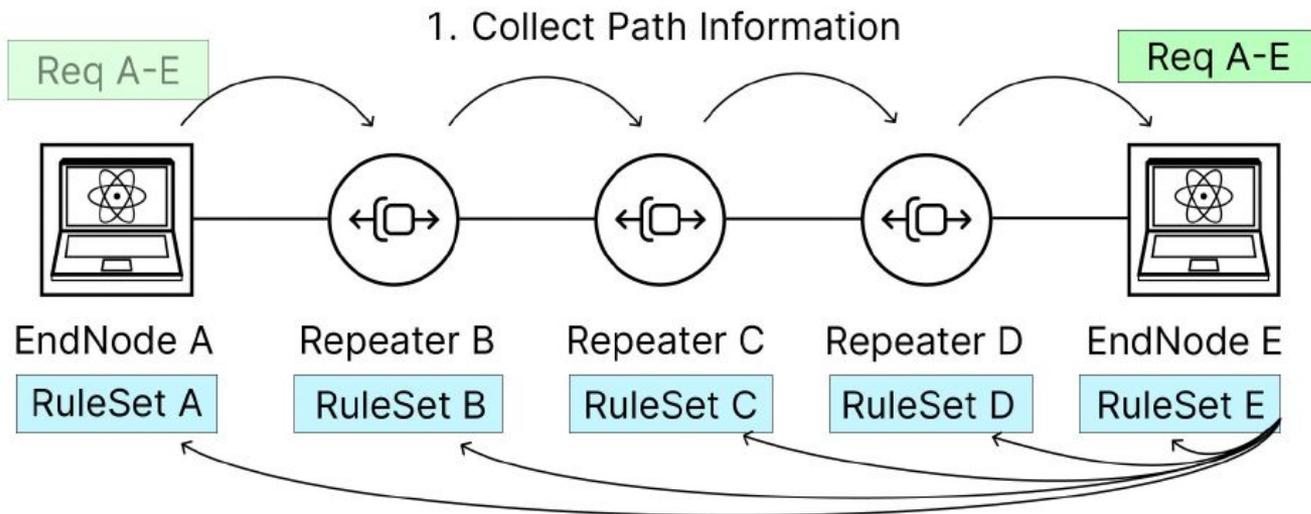
RuleSet-based Protocol

RuleSet(RS): a program for each node in a path. RS allows each node to do classical/quantum operations autonomously in a distributed manner.

- コンピュータネットワーク=複雑な分散処理

- 量子NWの場合:
量子チャンネルと古典チャンネルを跨ぐ分散処理になるため、さらに複雑に

→事前に最適化したルールセットによる分散処理を実施することで非効率やそれに由来するエラー等を低減



2. EndNode E Generates and Distributes RuleSets

分散量子処理をブロックしないために、ノード間の状態遷移等を一部事前定義

量子ネットワーク工学への注目の高まり

Awarded in IEEE Quantum Week 2022
(background result)



BEST PAPER AWARD

Presented to

Ryosuke Satoh, Michal Hajdušek, Naphan Benchasattabuse, Shota Nagayama,
Kentaro Teramoto, Takaaki Matsuo, Sara Ayman Metwalli, Paramet Pathumsoot,
Takahiko Satoh, Shigeya Suzuki, and Rodney Van Meter

Track: Quantum Networking and Communications

Paper Title: QuISP: a Quantum Internet Simulation Package



Greg Byrd
QCE22 General Chair
NC State University



Bert de Jong
QCE22 Program Chair
Lawrence Berkeley National Laboratory



Hausi Müller
QCE22 Finance Chair
QCE22 Workshops Co-Chair
Co-Chair Quantum Initiative



Stephan Eidenbenz
QCE22 Workshops Co-Chair
Los Alamos National Laboratory

Accepted to SIGCOMM (top-conference in
computer networks) 's workshop



1st Workshop on Quantum
Networks and Distributed
Quantum Computing (QuNet)

Call for Papers

RuleSet-based Recursive Quantum Internetworking

Kentaro Teramoto
R4D, Mercari, Inc., Tokyo, Japan
Graduate School of Media and
Governance
Keio University, Kanagawa, Japan
zigen@sfc.wide.ad.jp

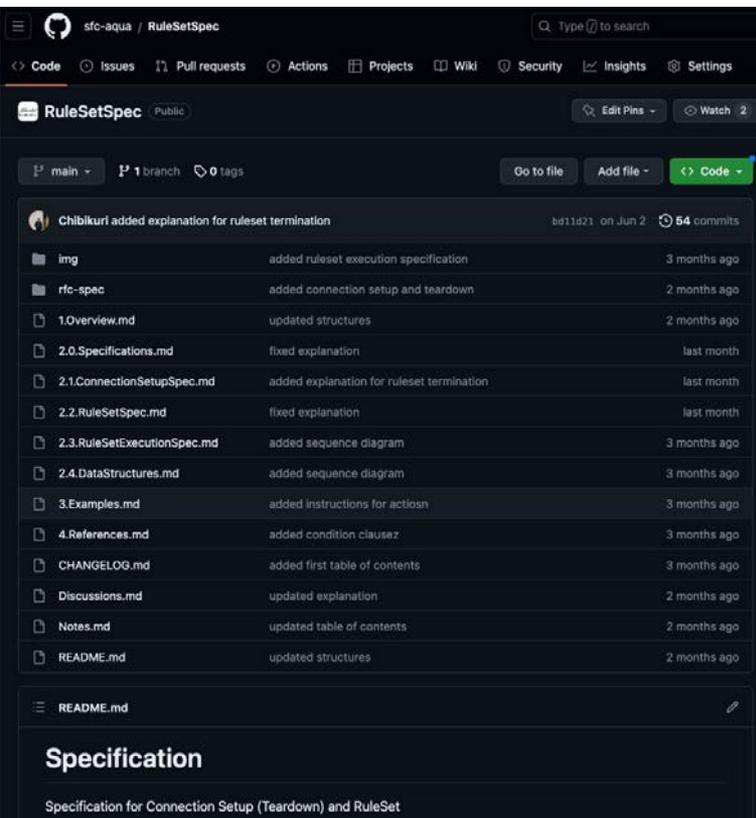
Michal Hajdušek
Graduate School of Media and
Governance
Keio University
Kanagawa, Japan
michal@sfc.wide.ad.jp

Toshihiko Sasaki
Department of Applied Physics,
Graduate School of Engineering
The University of Tokyo
Tokyo, Japan
sasaki@qi.t.u-tokyo.ac.jp

Rodney Van Meter
Faculty of Environment and
Information Studies
Keio University
Kanagawa, Japan
rdv@sfc.wide.ad.jp

Shota Nagayama
R4D, Mercari, Inc., Tokyo, Japan
Graduate School of Media and
Governance
Keio University, Kanagawa, Japan
shota@qitf.org

協調領域(アーキテクチャ・プロトコル仕様)のオープンイノベーション



sfc-aqua / RuleSetSpec

Code Issues Pull requests Actions Projects Wiki Security Insights Settings

RuleSetSpec Public

main 1 branch 0 tags

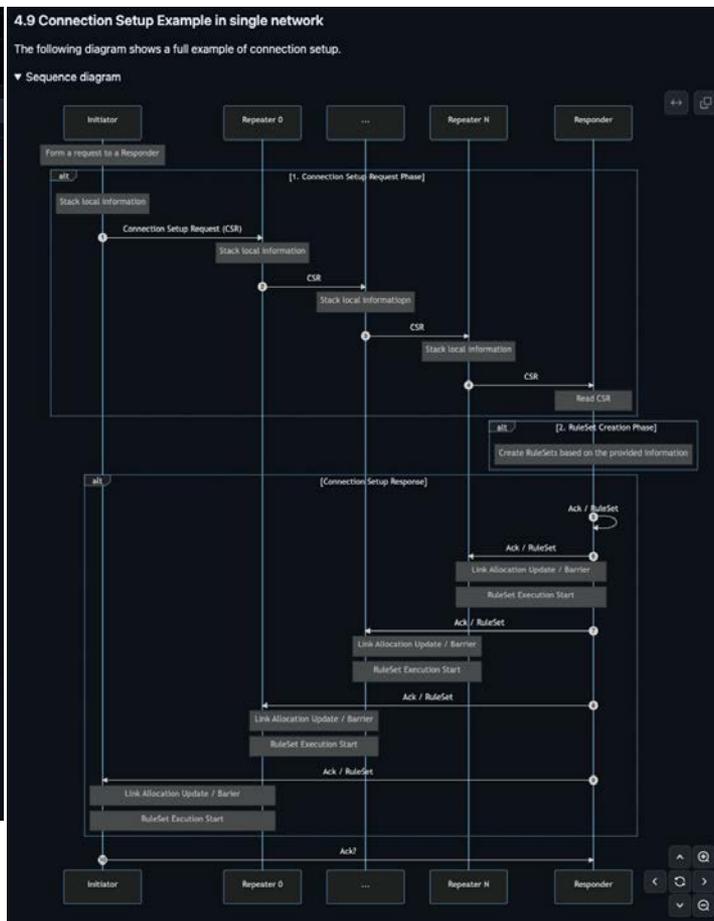
Go to file Add file Code

Chibikuri added explanation for ruleset termination b011d21 on Jun 2 54 commits

- img added ruleset execution specification 3 months ago
- rfc-spec added connection setup and teardown 2 months ago
- 1.Overview.md updated structures 2 months ago
- 2.0.Specifications.md fixed explanation last month
- 2.1.ConnectionSetupSpec.md added explanation for ruleset termination last month
- 2.2.RuleSetSpec.md fixed explanation last month
- 2.3.RuleSetExecutionSpec.md added sequence diagram 3 months ago
- 2.4.DataStructures.md added sequence diagram 3 months ago
- 3.Examples.md added instructions for actions 3 months ago
- 4.References.md added condition clausez 3 months ago
- CHANGELOG.md added first table of contents 3 months ago
- Discussions.md updated explanation 2 months ago
- Notes.md updated table of contents 2 months ago
- README.md updated structures 2 months ago

Specification

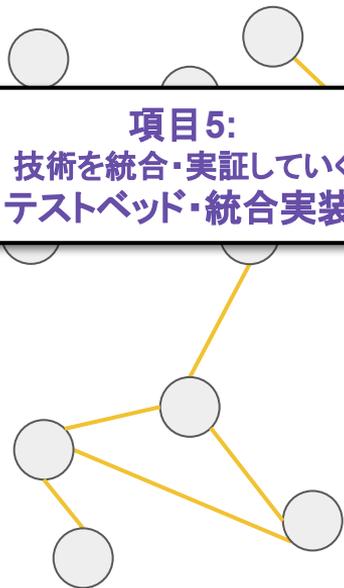
Specification for Connection Setup (Teardown) and RuleSet



- Computer networking itself is a complex distributed computation, even in classical networks.
- Quantum computer networking is more complex distributed computation crossing quantum and classical computing.
- Key components of distributed computing is complex state machine. Any idea to simplify the state machine?
→Rule-set based networking !!

量子ネットワーク

○ : 量子ノード
— : 量子通信路 (e.g. 光ファイバー)



項目5:
技術を統合・実証していく
テストベッド・統合実装

項目4:
量子情報の分散環境が可能
とする
分散量子アプリ

項目1: 強靱で大規模な通信
網を実現する新しいネット
ワークアーキテクチャ・プ
ロトコル

項目3: 量子信号の中継・変
換を実現する
量子メモリ・量子中継

項目2: 量子光の精緻な制御
を可能にする
量子光通信技術

社会実装

インフラ化

ユースケース

情報学(理論+工学)

分散アルゴリズム

アプリケーション

計算機工学

ネットワーク理論
・グラフ理論

ソフトウェア工学
・システムソフトウェア
・分散システム
・セキュリティ

通信理論/通信工学
・符号

ネットワーク工学
・プロトコルスタック

量子力学・光学 (理論+工学)

量子エレクトロニクス、量子デバイス、
量子光学、光物性、非線形光学
量子制御工学、物性 etc.

項目4:量子情報の分散環境が可能とする分散量子アプリ

課題3:分散環境を用いた量子アプリケーションの理論提案

Yuichiro Matsuzaki, Chuo Univ.

Direct use of Quantum properties of the distributed computing environment

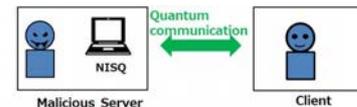
Background results

センシングと計算の融合
秘匿量子計算アプリ

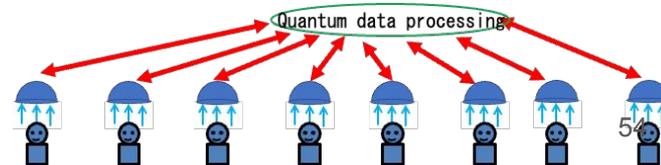
PHYSICAL REVIEW A 99(2) 1-14 2019

JPSJ 91(7) 1-12 (2022)

Physical Review A 105(2) 1-10 (2022)



	Qubit number	Security
Conventional QC	N 😊	No security 😞
Blind QC	$3N$ 😞	Almost all information is secured 😊
	$N+1$ 😊	Ansatz parameters and outputs are hidden (ansatz circuit is known) 😊



Engineering to implement quantum programs on the distributed environment

Quantum properties of distributed computing environments

量子計算overネットワーク

Phys. Rev. A 84, 012333 (2011)

IEEE Trans. on Information Theory 63, 5372 - 5403 (2017)

量子計算リソース評価

PRL 107, 180501 (2011)

課題2:分散処理プロトコルとユースケースの研究開発

Takahiko Satoh, Keio Univ.



Reduce requirement for hardware



課題1:分散処理環境における量ⓧ性とその応ⓧ研究

Akihito Soeda, NII

Verification of hardware for application

Background results

量子アプリ&量子プログラミング

Physical Review A 101 (5), 052301

IEEE Transactions on Quantum Engineering 1, 1-15

量子ネットワークコーディング

Physical Review A 93 (3), 032302

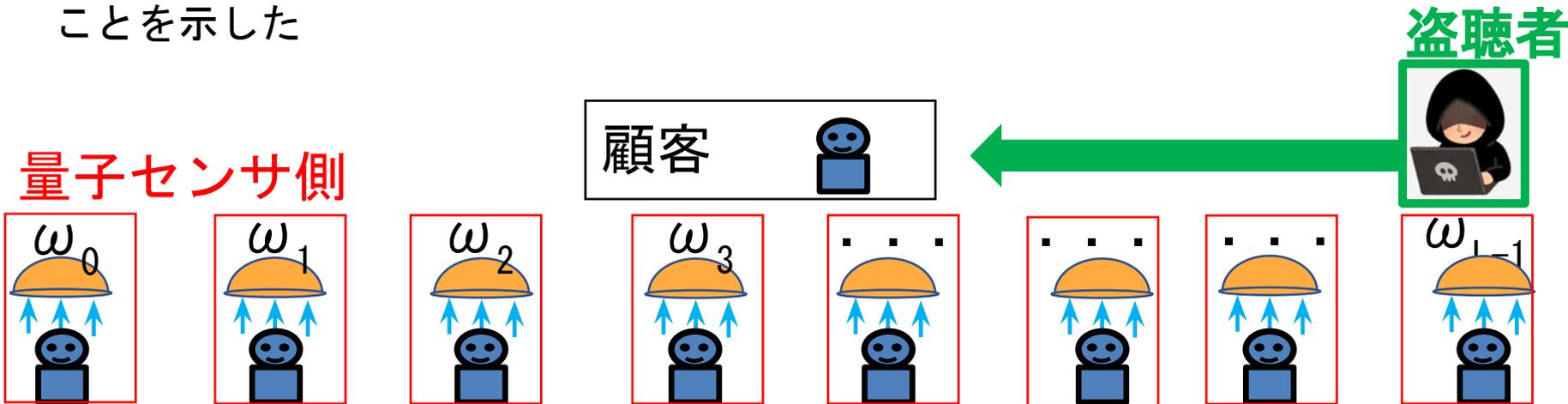
Physical Review A 97 (6), 062328

量子センサネットワークによる統計量の推定

“Anonymous estimation of intensity distribution of magnetic fields”
with quantum sensing network

Hiroto Kasai, Yuki Takeuchi, Yuichiro Matsuzaki, Yasuhiro Tokura. arXiv:2305.14119

- 量子センサネットワークを用いて、磁場の個別の値を知らずに、平均値、分散、歪度、尖度などの統計量を計測する手法を提案
- 量子ビット数の大きい極限では、盗聴者が（磁場に依存する）量子状態にPOVMを行っても、磁場の個別情報が取得できないことを示した





まとめ

まとめ

ネットワーク化による 分散量子コンピュータ

計算力 = 集積力 × 通信力

大規模分散量子コンピュータの三要素

- 量子コンピュータそのもの
- 量子通信インタフェース
- [本プロジェクト] 量子コンピュータ同士の自在な接続を可能にする量子ネットワーク

ハードウェア

	超伝導	イオン トラップ	光子	半導体 量子ドット	半導体 シリコン	中性原子 2次元	中性原子 ナノワイヤ
	山本剛 PM	高橋俊樹 PM	古澤明 PM	水野弘之 PM	樽茶清悟 PM	大森賢治 PM	青木隆朗 PM
通信ネットワーク	小坂英男 PM	山本俊 PM	永山翔太 PM	量子ビット接続で連携			
誤り耐性	各ハードの理論検証、新規誤り訂正理論の考案、クラウド公開、シミュレーション開発、人材交流、理論教育成などで連携						
	誤り訂正システム開発(誤り訂正ソフトウェア及び実行システム・装置)						



項目5: 技術を統合・実証していく テストベッド・統合実装

情報学(理論+工学)

項目4:
量子情報の分散環境が可
能とする
分散量子アプリ

分散アルゴリズム

アプリケーション

項目1:強靱で大規模な通
信網を実現する新しいネッ
トワークアーキテクチャ
・プロトコル

計算機工学

ネットワーク理論
・グラフ理論

ソフトウェア工学
・システムソフトウェア
・分散システム
・セキュリティ

項目3:量子信号の中継・
変換を実現する
量子メモリ・量子中継

通信理論通信工学
・符号

ネットワーク工学
・プロトコルスタック

項目2:量子光の精緻な制
御を可能にする
量子光通信技術

量子力学・光学量子エレクトロニクス、量子デバイ
(理論+工学) ス、
量子光学、光物性、非線形光学
量子制御工学、物性等。

2010年代: 量子コンピュータ実装開始
2020年代: 量子ネットワーク実装開始