

## 超伝導量子回路の集積化技術の開発

### プロジェクトマネージャー (PM)

山本 剛 (日本電気株式会社 システムプラットフォーム研究所 主席研究員)



**代表機関:** 日本電気 (株)

**研究開発機関:** (株) アルバック、アルバック・クライオ (株)、大阪大学、慶應義塾大学、産業技術総合研究所、自然科学研究機構 国立天文台、情報通信研究機構、東京医科歯科大学、東京大学、東京理科大学、名古屋大学、ナノブリッジ・セミコンダクター (株)、(株) ニコン、日本電気 (株)、日本電信電話 (株)、理化学研究所

### 研究開発プロジェクト概要

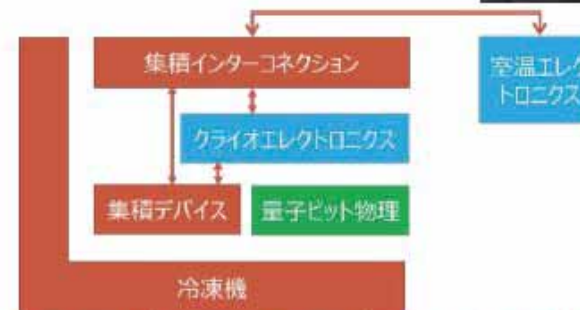
超伝導量子コンピュータの研究開発を加速するため、超伝導量子ビットの大規模化、高集積化に必要とされるハードウェア要素技術を開発します。それにより、2050年には、大規模な超伝導量子コンピュータの実現を目指します。

### 2030年までのマイルストーン

量子ビット数の拡張が可能な方式による量子誤り訂正を実現する。

### 2025年までのマイルストーン

周辺回路の低温動作を実現し、誤り訂正に必要な規模まで超伝導量子ビットの高集積化が可能であることを示す。



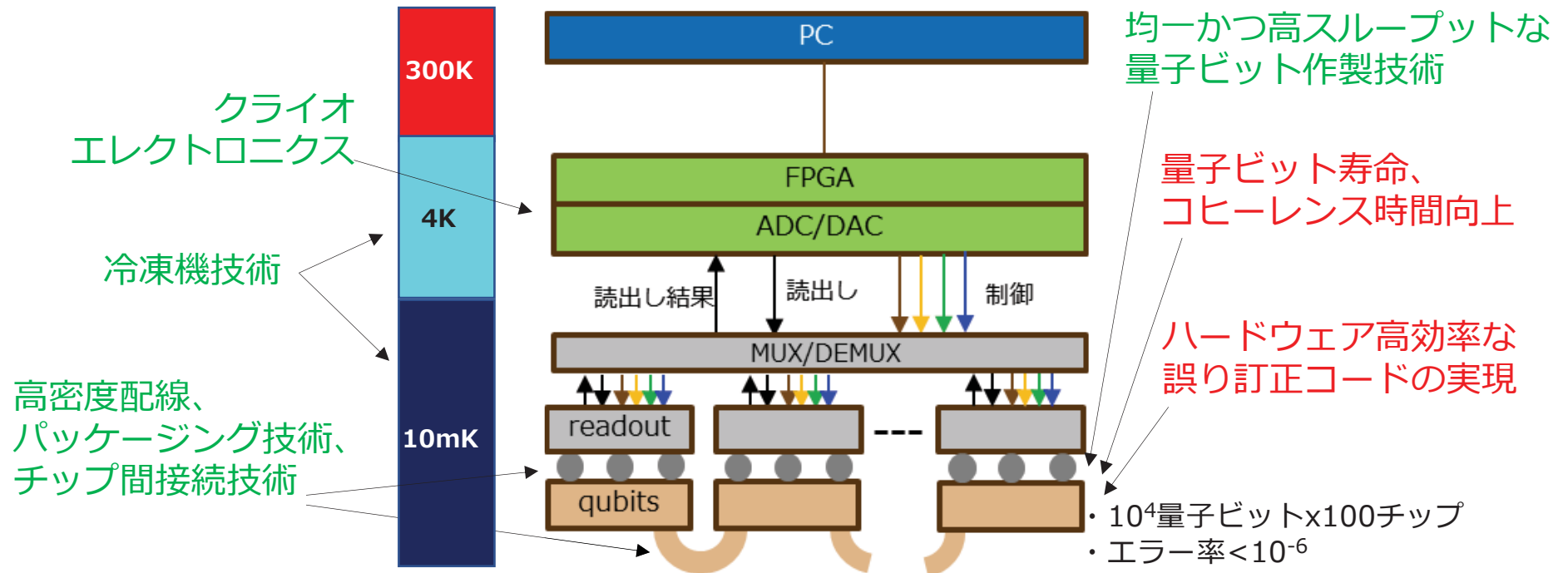
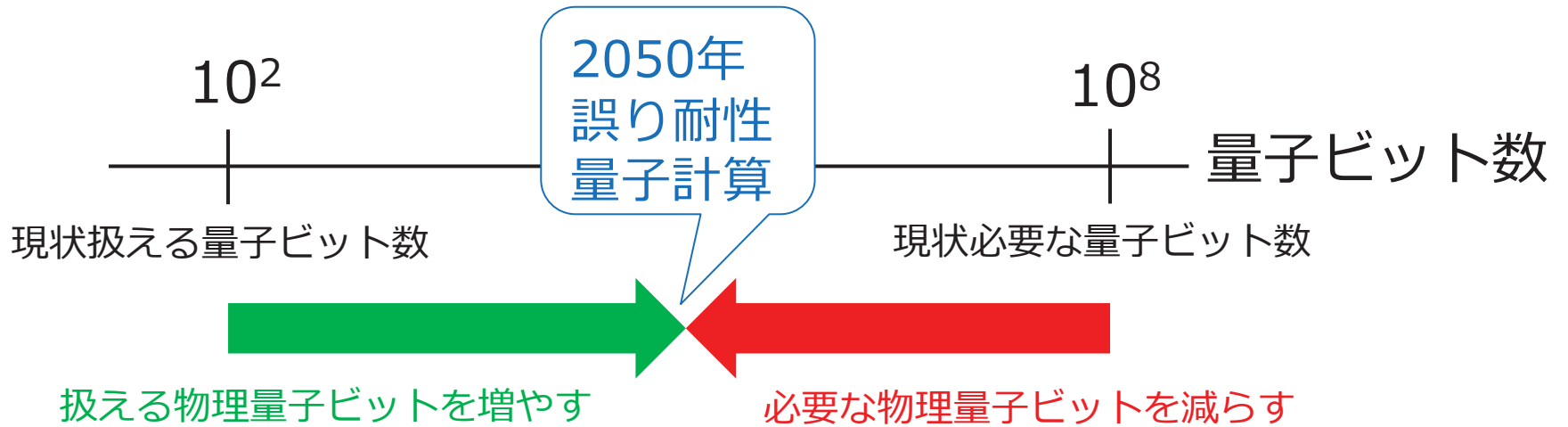
- **誤り耐性量子コンピュータ用量子ビット回路の研究開発**
  - ・ 日本電気株式会社、産業技術総合研究所、NTT、情報通信研究機構、理化学研究所、株式会社ニコン、東京医科歯科大、名古屋大学、東京理科大学
- **量子ビット集積ハードウェアシステムの研究開発**
  - ・ 理化学研究所、アルバック・クライオ株式会社、株式会社アルバック、国立天文台、情報通信研究機構
- **量子誤り訂正用エレクトロニクスの研究開発**
  - ・ 名古屋大学、ナノブリッジセミコンダクター株式会社、大阪大学、東京大学、慶応大学

プロジェクト紹介 [https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal6/67\\_yamamoto.html](https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal6/67_yamamoto.html)

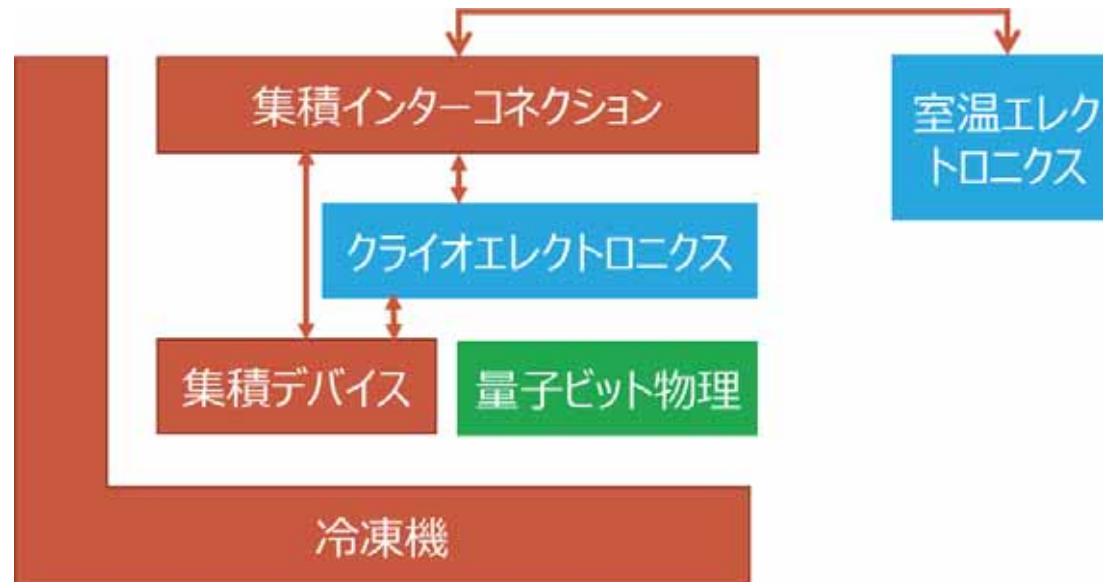
資料 [https://www.jst.go.jp/moonshot/news/pdf/01\\_20210311\\_yamamototsuyoshi.pdf](https://www.jst.go.jp/moonshot/news/pdf/01_20210311_yamamototsuyoshi.pdf)

プレゼン <https://youtu.be/9STuBujrHWM>

# 本提案で取り組む課題と目指すシステム



# 全体構成



- 誤り耐性量子コンピュータ用量子ビット回路の研究開発
  - ・ 日本電気株式会社、産業技術総合研究所、NTT、情報通信研究機構、理化学研究所、株式会社ニコン、東京医科歯科大、名古屋大学
- 量子ビット集積ハードウェアシステムの研究開発
  - ・ 理化学研究所、アルバック・クライオ株式会社、株式会社アルバック、国立天文台、情報通信研究機構
- 量子誤り訂正用エレクトロニクスの研究開発
  - ・ 名古屋大学、ナノブリッジセミコンダクター株式会社、大阪大学、東京大学、慶応大学

# ERATO, Q-LEAPプロジェクトとの関係

## Q-LEAP目標

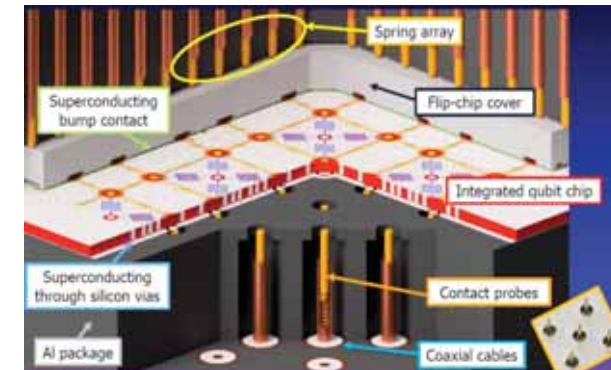
- ~100個のtransmon qubitを用いてNISQ動作実証 (2027)

## Q-LEAPで取り組んでいること

- ・量子ビットアレーへの垂直配線技術
- ・100ビット対応室温制御・読出しエレクトロニクスの構築
- ・広帯域JPAの開発

## Q-LEAPで(十分には)取組めていないこと

- ・クライオエレクトロニクス
- ・集積インターコネクション(フリップチップボンディングによる配線、アイソレータ、アンプ等マイクロ波部品の集積化)
- ・デコヒーレンス源の系統的調査
- ・transmon以外の高コヒーレンス量子ビット
- ・表面符号以外の符号方式



中村先生の講演資料より

## 本プロジェクトの役割

Q-LEAPのNISQマシンを、誤り耐性量子計算機へと  
スケールアップさせるための基盤技術を開発する

## イオントラップによる光接続型誤り耐性量子コンピュータ

### プロジェクトマネージャー (PM)

高橋 優樹 (沖縄科学技術大学院大学 量子情報物理実験ユニット 准教授)

**代表機関:** 沖縄科学技術大学院大学

**研究開発機関:** 大阪大学、沖縄科学技術大学院大学、情報通信研究機構、東京大学



### 研究開発プロジェクト概要

複数のイオントラップを光で連結する新しいアイデアにより、従来技術では達成できない、大規模化が容易なイオントラップデバイスを開発します。それにより、2050年には、大規模な量子コンピュータの実現を目指します。

### 2030年までのマイルストーン

イオントラップモジュールを光接続し誤り訂正可能な規模の光接続型量子コンピュータを実現する。

### 2025年までのマイルストーン

量子ビット数の拡張を可能とするイオントラップモジュールを開発し、誤り訂正に必要な規模まで拡張可能であることを示す。

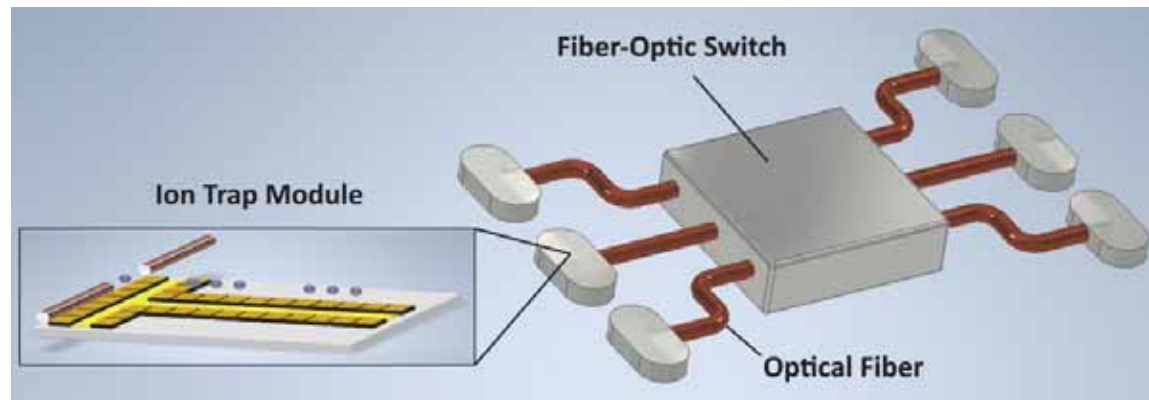
<p>研究開発項目1:イオントラップの量子光接続に関する研究開発</p>  <p>微小光共振器との結合により 光接続効率の大幅な向上!</p>  <p>高橋優樹 (OIST)</p>	<p>研究開発項目3:振動自由度を用いた量子誤り訂正符号実装のための研究開発</p>  <p>集団フォノン モードの量子制御によりボ ジニック符号の実 現!</p>  <p>豊田健二 (阪大)</p>
<p>研究開発項目2:超伝導マイクロ波回路を用いたイオントラップの開発</p>  <p>超伝導共振回路により高速・高精度 ・低電力な量子論理ゲートの実現!</p>  <p>野口篤史 (東大)</p>	<p>研究開発項目4: 4-1: 高性能イオントラップ作製・評価技術の確立 各所を支えるトラップ供給 コミュニティ向け汎用トラップ</p>  <p>早坂和弘 (NICT)</p> <p>4-2: イオントラップ量子コンピュータのクラウド化基盤技術(豊田) 社会実装に向けた基盤技術の検証</p>

プロジェクト紹介 [https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal6/63\\_takahashi.html](https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal6/63_takahashi.html)

資料 [https://www.jst.go.jp/moonshot/news/pdf/02\\_20210311\\_takahashi.pdf](https://www.jst.go.jp/moonshot/news/pdf/02_20210311_takahashi.pdf)

プレゼン <https://youtu.be/jl9dH3eaCZc>

## 光接続型イオントラップ量子コンピュータ



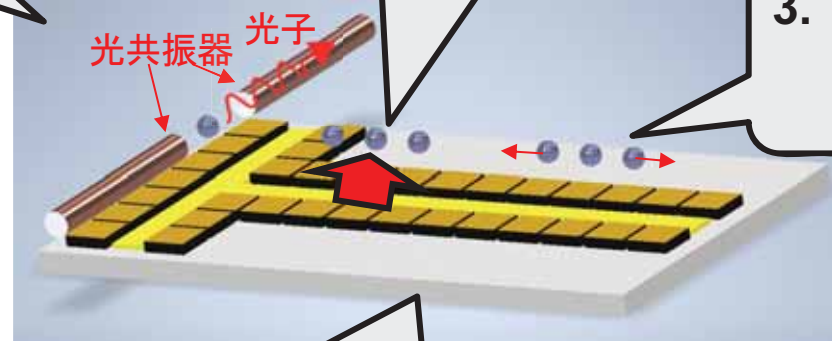
1. **トラップモジュールを光を使って相互接続（量子光接続）**  
→ 単一のイオントラップを超えた拡張性
2. **高機能イオントラップモジュール**  
→ イオンの自由度（光、MW、振動）を使い尽くす

# 高機能トラップモジュールの開発

1. 高効率な量子光  
インターフェース

2. 超高精度・高速  
量子論理ゲート

3. 振動状態の量子  
制御と誤り訂正  
への応用



4-1. 高性能イオントラップ  
作製・評価技術

4-2. クラウド化基盤技術

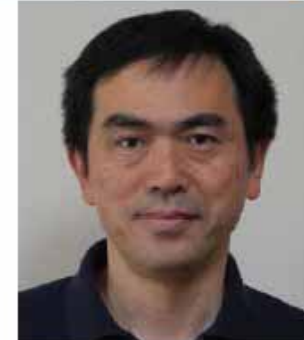
## 誤り耐性型大規模汎用量子コンピュータの研究開発

### プロジェクトマネージャー (PM)

古澤 明 (東京大学 大学院工学系研究科 教授)

代表機関：東京大学

研究開発機関：東京大学、日本電信電話(株)、理化学研究所



### 研究開発プロジェクト概要

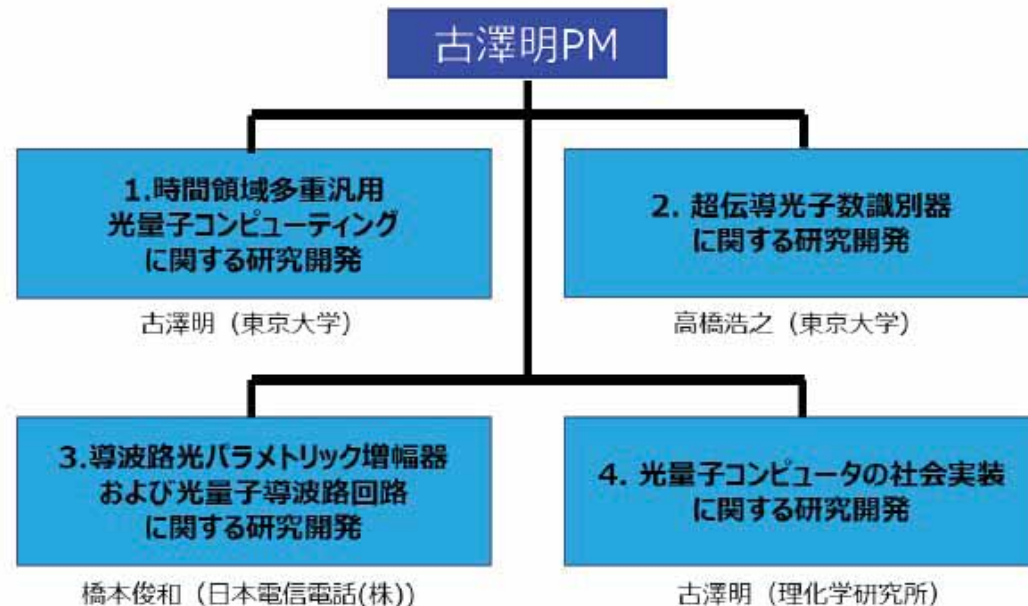
独自に開発した量子ロックアップテーブル法を発展させ、大規模な誤り耐性のある量子演算を実現します。それにより、2050年には、常温動作を特徴とする大規模な光量子コンピュータの実現を目指します。

### 2030年までのマイルストーン

誤り耐性型全光学式光量子コンピュータ実現に向けて、量子誤り訂正実験を成功させる。

### 2025年までのマイルストーン

誤り耐性型全光学式光量子コンピュータ実現に向けて、量子誤り訂正しきい値を超える量子もつれ光を実現する。



プロジェクト紹介 [https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal6/64\\_furusawa.html](https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal6/64_furusawa.html)

資料 [https://www.jst.go.jp/moonshot/news/pdf/03\\_20210311\\_furusawa.pdf](https://www.jst.go.jp/moonshot/news/pdf/03_20210311_furusawa.pdf)

プレゼン <https://youtu.be/8J1U9XpnXjo>



**Logical qubits for quantum error correction**

Clifford

Gaussian

**GKP qubits & Logical operations**

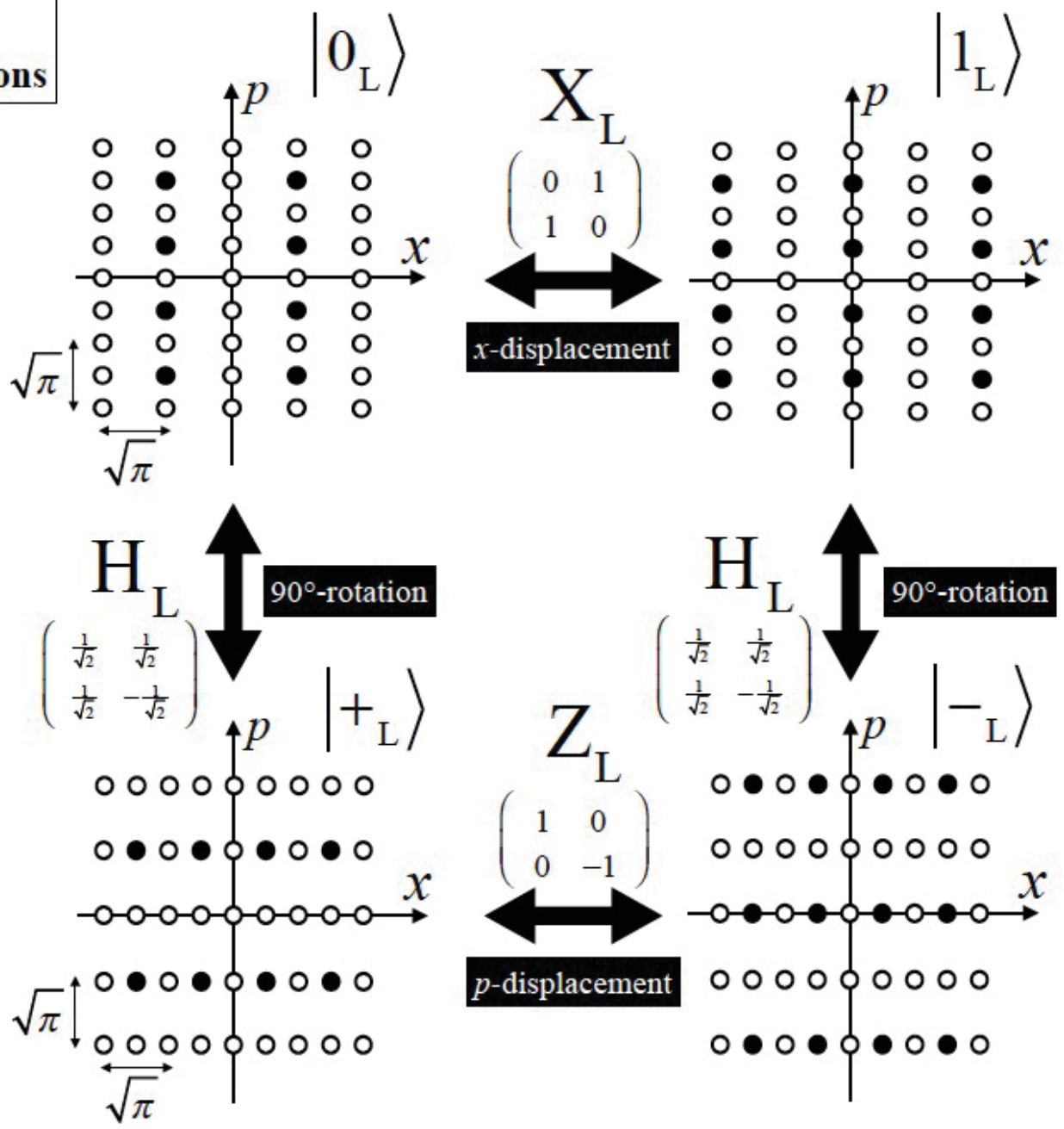
- $+\infty$
- $-\infty$

Complex amplitude

$$\hat{a} = \hat{x} + i\hat{p}$$

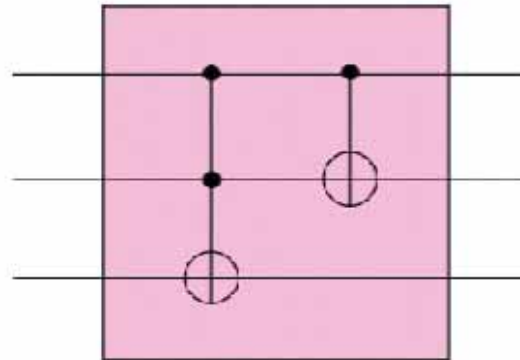
$$[\hat{x}, \hat{p}] = \frac{i}{2}$$

$$\hbar = \frac{1}{2}$$



# Quantum computing

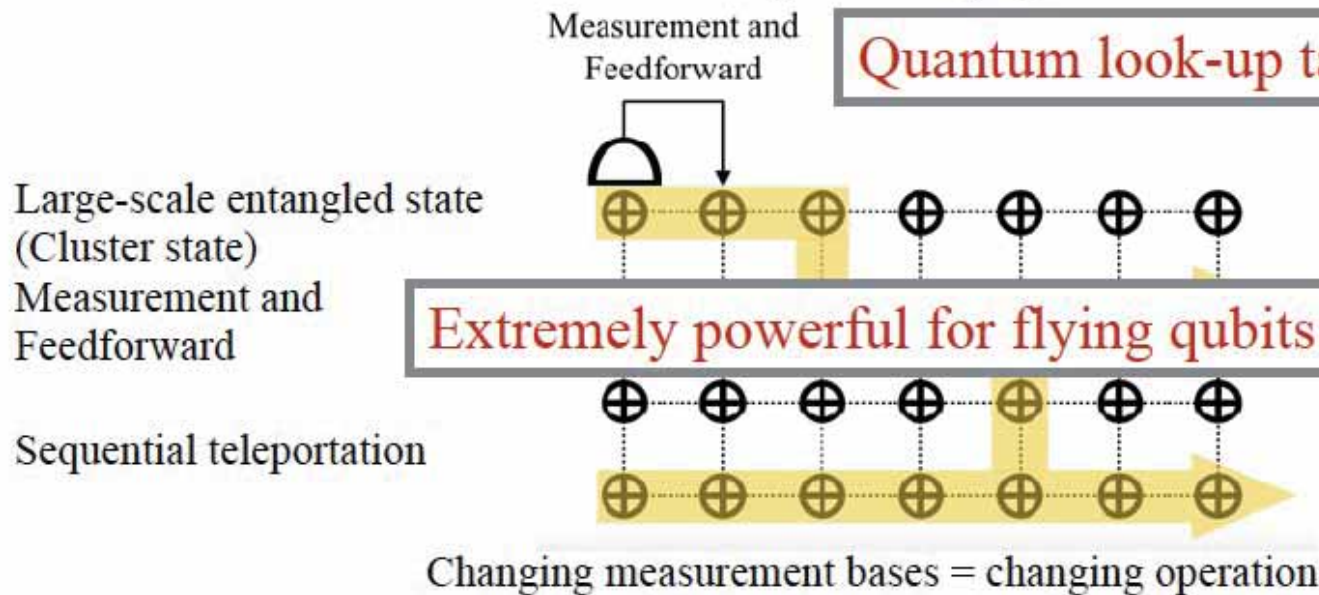
## Quantum circuit model



Qubit  
R. P. Feynman (1980)

Continuous variable  
S. Lloyd and S. L. Braunstein (1999)

## Measurement-based model (one-way quantum computing)



Qubit  
R. Raussendorf and H. J. Briegel (2001)

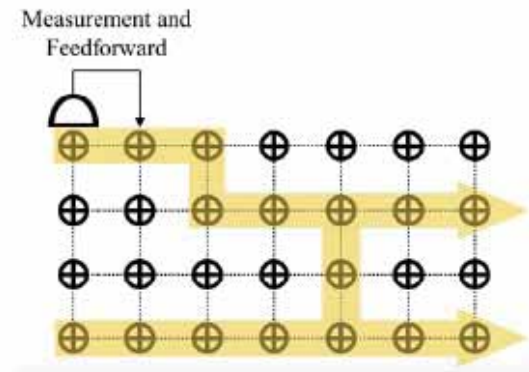
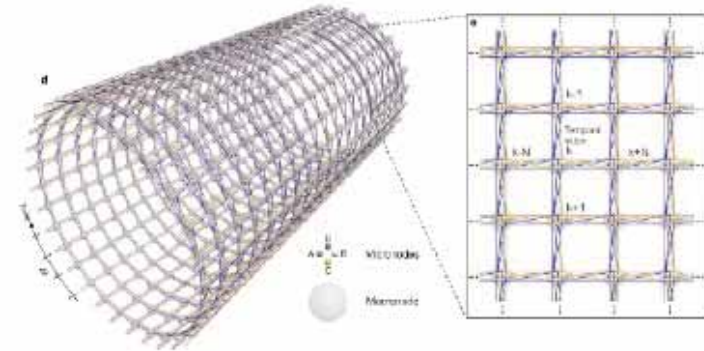
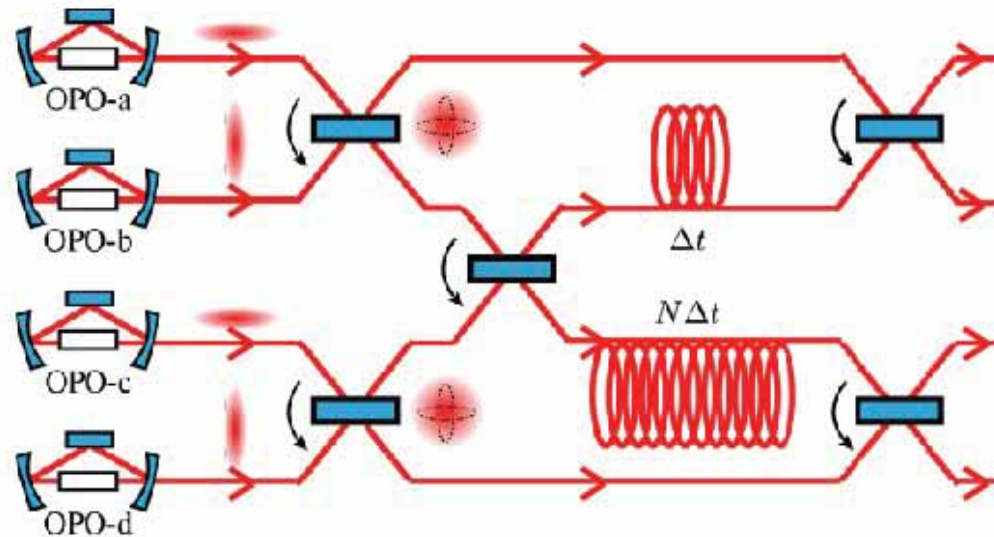
$$\oplus = (|0\rangle + |1\rangle) / \sqrt{2}$$

Continuous variable  
N. C. Menicucci and P. van Loock et al. (2006)

$$\oplus = \int_{-\infty}^{+\infty} dx |x\rangle$$

# Time-domain multiplexed 2D cluster state

Quantum look-up table



## QUANTUM COMPUTING

# Generation of time-domain-multiplexed two-dimensional cluster state

Science 366, 373 (2019)

Warit Asavanant<sup>1</sup>, Yu Shiozawa<sup>1</sup>, Shota Yokoyama<sup>2</sup>, Baramée Charoensombutamon<sup>1</sup>, Hiroki Emura<sup>1</sup>, Rafael N. Alexander<sup>3</sup>, Shuntaro Takeda<sup>1,4</sup>, Jun-ichi Yoshikawa<sup>1</sup>, Nicolas C. Menicucci<sup>5</sup>, Hidehiro Yonezawa<sup>2</sup>, Akira Furusawa<sup>1,\*</sup>

## 大規模集積シリコン量子コンピュータの研究開発

### プロジェクトマネージャー (PM)

水野 弘之 (株式会社日立製作所 研究開発グループ 基礎研究センタ 主管研究員兼日立京大ラボ長)



**代表機関:** (株) 日立製作所

**研究開発機関:** 神戸大学、東京工業大学、(株) 日立製作所、理化学研究所

### 研究開発プロジェクト概要

半導体の回路集積化技術を活かし、シリコン量子ビットの大規模化、高集積化を実現します。それにより、2050年には、高集積性・低消費電力を特徴とする大規模な量子コンピュータの実現を目指します。

### 2030年までのマイルストーン

シリコン量子コンピュータの大規模化を実現し、誤り訂正とシリコン量子コンピュータの有効性を示すクラウドサービスを開始する。

### 2025年までのマイルストーン

2次元量子ビットアレイの開発と、それを用いたシリコン量子コンピュータでの量子ビット演算を実証し、誤り訂正に必要な規模まで拡張可能であることを示す。

PM:  
水野弘之

課題推進者1: 日立/水野弘之  
量子コンピューティングシステム

課題推進者2: 神戸大/永田真  
極低温複数チップ実装システム

課題推進者3: 東工大/小寺哲夫  
ホットシリコン量子ビット

課題推進者4: 理研/中島峻  
小規模回路による量子演算

### 他研究開発プロジェクト連携

- 量子誤りに対する解法【東大/小芦PM】
- 量子ビットアレイ間の量子ネットワーク構築【阪大/山本俊PM】

プロジェクト紹介 [https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal6/65\\_mizuno.html](https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal6/65_mizuno.html)

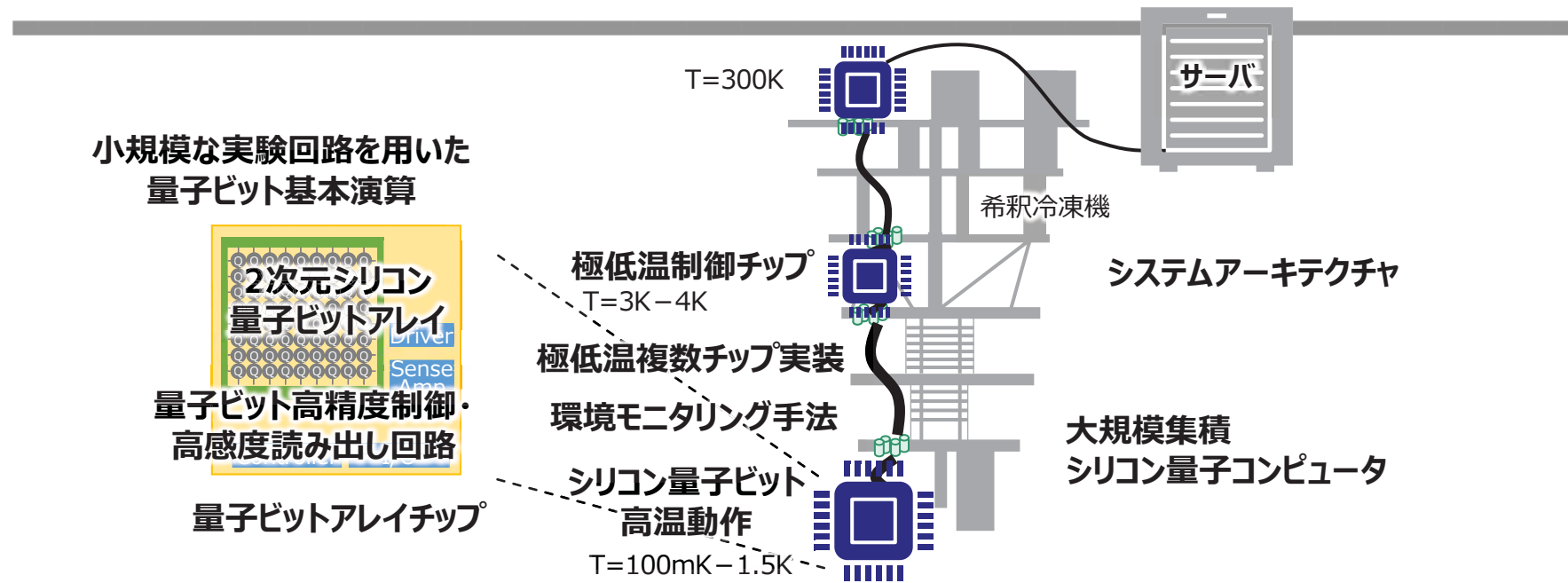
資料 [https://www.jst.go.jp/moonshot/news/pdf/04\\_20210311\\_mizuno.pdf](https://www.jst.go.jp/moonshot/news/pdf/04_20210311_mizuno.pdf)

プレゼン <https://youtu.be/oYPO4bGf424>

# 研究開発項目と研究開発課題



**HITACHI**  
Inspire the Next



研究開発項目		研究開発課題	
1	量子コンピューティングシステム	1	2次元量子ビットアレイ
		2	量子ビット高精度制御・高感度読み出し回路
		3	システムアーキテクチャ
2	極低温複数チップ実装システム	4	極低温複数チップ実装
		5	環境モニタリング手法
3	ホットシリコン量子ビット	6	シリコン量子ビットの高温動作
4	小規模回路による量子演算	7	小規模な実験回路を用いた量子ビット基本演算

# シナリオとマイルストーン



- シリコン量子ビットの特徴を活かしたシナリオでの早期社会実装と目標達成を狙う

