

# 量子ビットを電子波束で構成する 新原理の量子コンピュータ

所属 理化学研究所  
創発物性科学研究センター  
量子電子デバイス研究チーム  
氏名 山本 倫久

2024年6月20日

# 開発プロジェクト

- JST-CREST 「量子技術」 （総括：荒川 泰彦）  
「半導体非局在量子ビットの量子制御」  
(2018.10 ~ 2024.3)
- ムーンショット目標6 「誤り耐性型汎用量子コンピュータ」 (JST)  
(PD:北川 勝浩、PM: 樽茶 清悟)  
「新原理電子波束量子ビットの開発」 (調査研究)  
(2022.10 ~ 2025.11)

# 従来技術とその問題点

量子コンピュータの開発競争：特徴が異なる様々なプラットフォーム  
大規模化が共通の課題

固体の量子コンピューター：「局在した」量子を制御

- ハードウェアサイズ（配線数）が量子ビットの数に比例して増大する
- 巨大なシステムが必要

光の量子コンピューター：「非局在型」（伝搬型）の量子制御

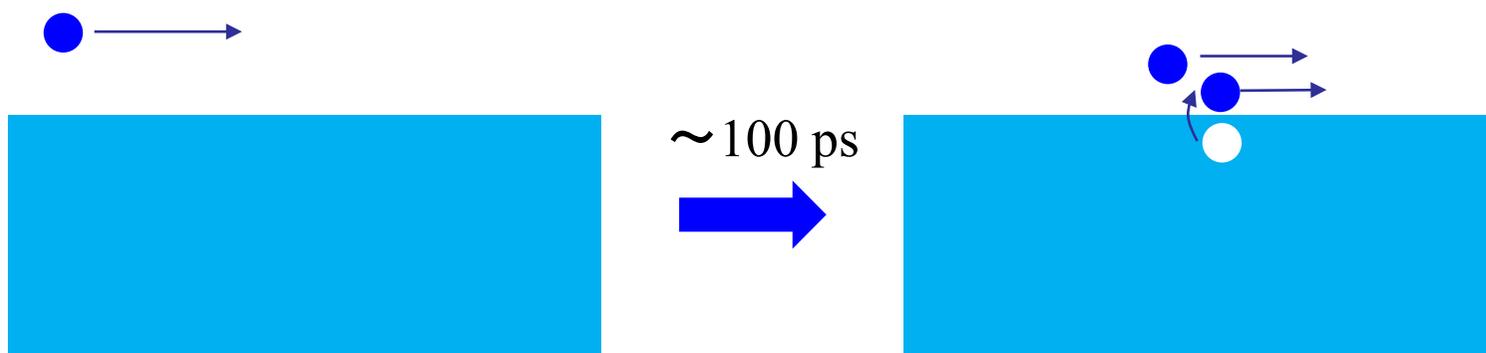
- 単一光子レベルの制御や検出が困難
- 巨大なシステムが必要

# 新技術の特徴・従来技術との比較

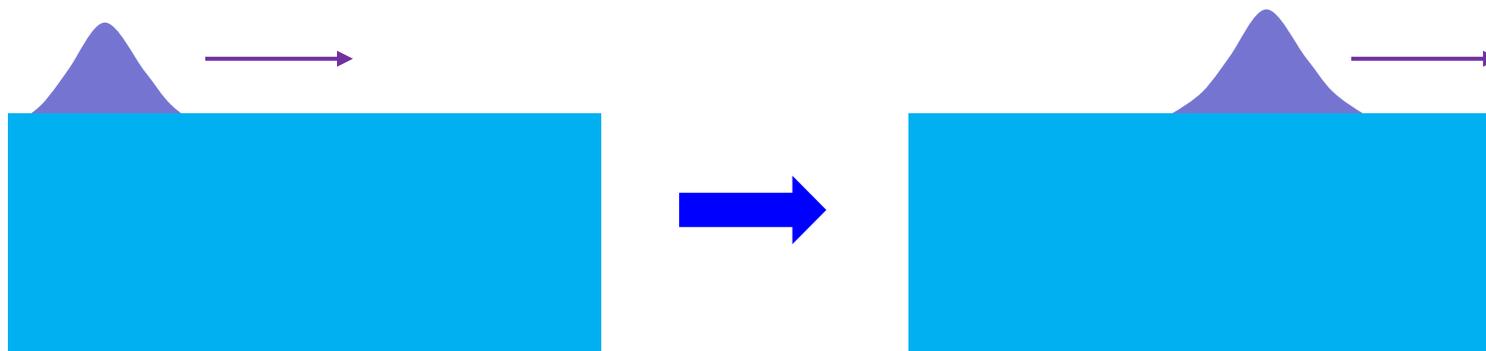
- 固体中の伝搬型の量子情報
- 従来技術の問題点であった、大規模量子計算におけるハードウェアの巨大化を解決する新しい方法
- 1台の冷凍機で有用な誤り耐性型量子コンピューターを構成できる可能性がある
- 現在開発中のシステム：20本程度の高周波配線で1000程度の量子ビットを制御（数年を目処に開発予定）

# 電子の波束を使用する理由

通常の「電子」: 電子間相互作用によって短時間で緩和

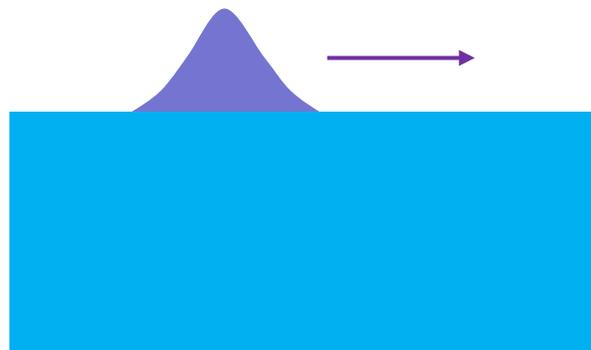


短波束: 電子間相互作用によって緩和しない(一次元系)



# 短電子波束の性質

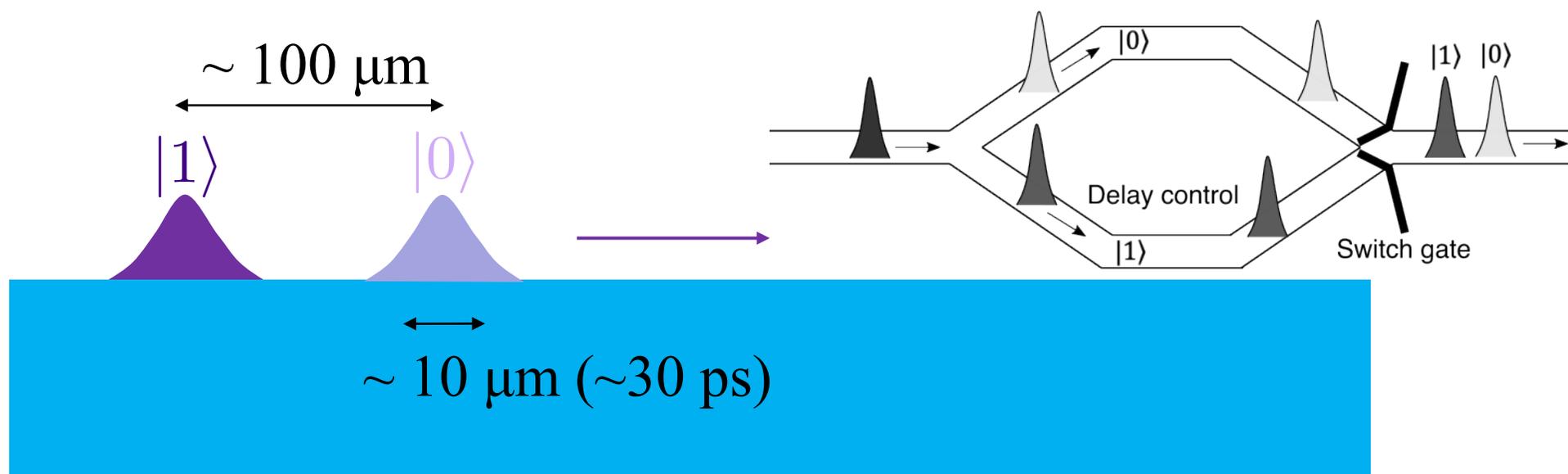
- 波束の「電荷」: 波束の大きさ(積分)で決まる  
1-10 ×  $e$  程度 ( $e$ : 電子の電荷)
- 多数の相互作用電子(数100から数1000)で構成される
- 電子間相互作用によって伝搬する  
相互作用を繰り返した固有の伝搬速度(単電子より高速)
- 電子間相互作用により伝わるため、「線形分散」  
速度がエネルギーに依らない: 伝搬波束の形状、幅が不変



# 飛行量子ビット (Flying qubit)

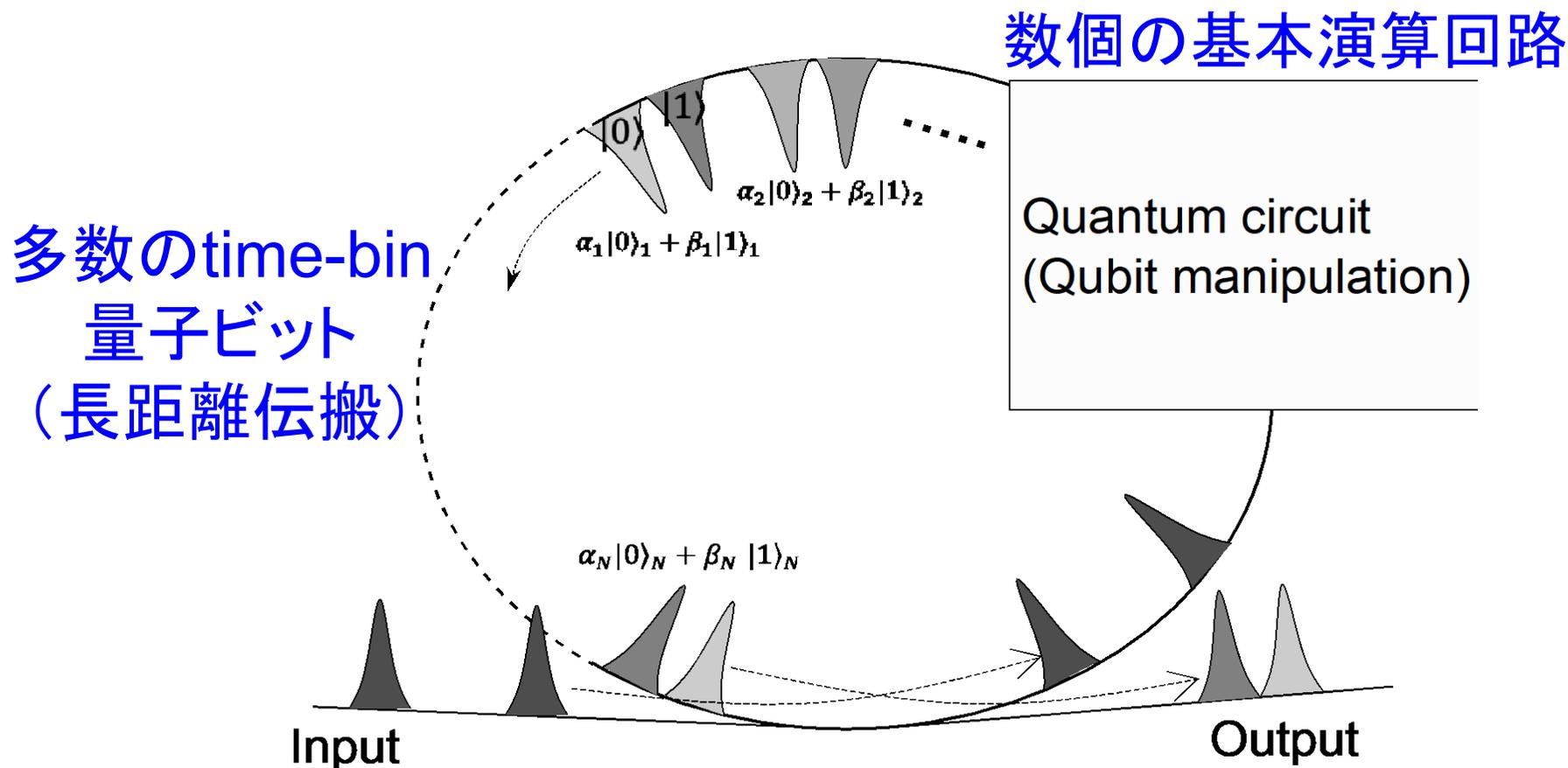
- 伝搬する多体電子波束の量子状態で量子ビット定義
- 安定なのは **time-bin量子ビット** (必須)

先行する波束と遅延する波束の重ね合わせ  
長距離伝搬中に環境の揺らぎによる影響を受けない



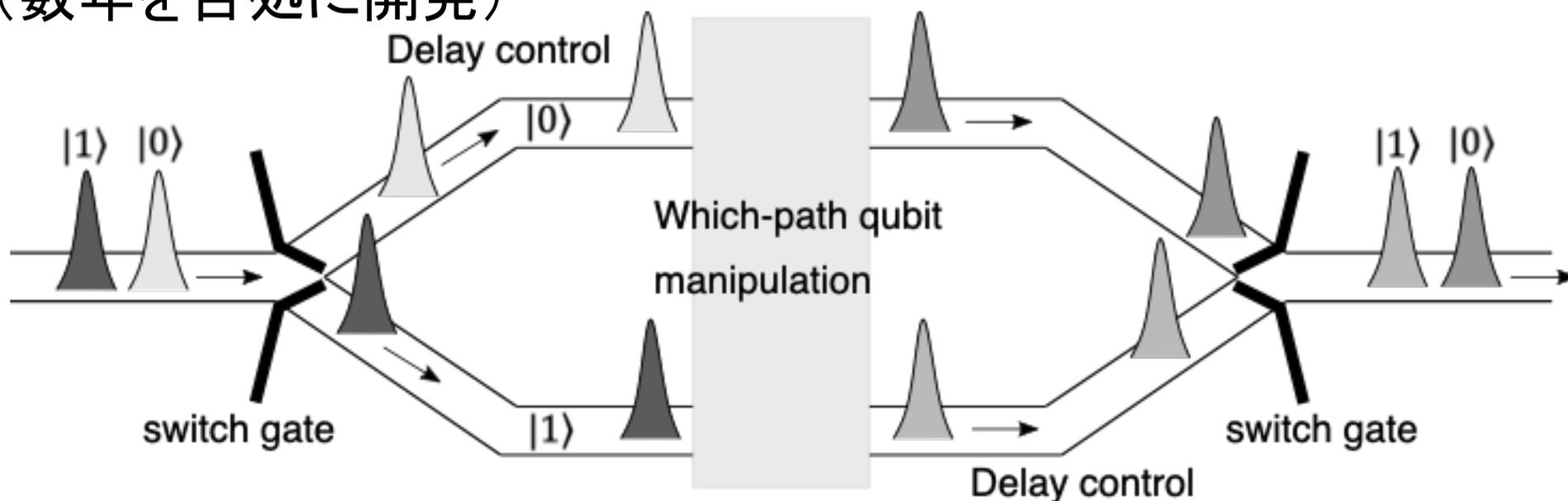
# 飛行量子ビットを用いた量子コンピューター

- 長さ1m以上のループ構造を前提（数1000量子ビット/ループ）



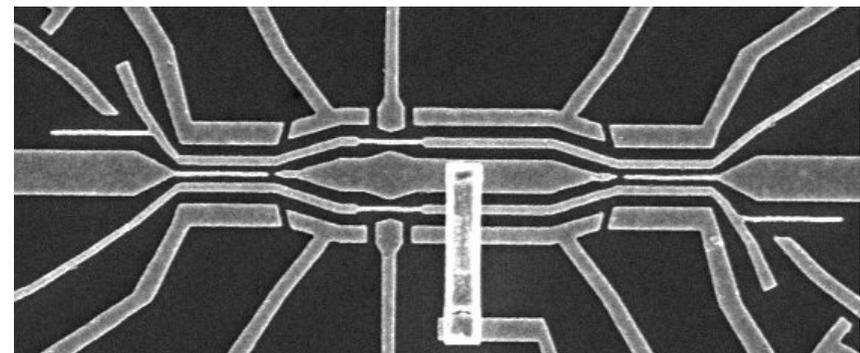
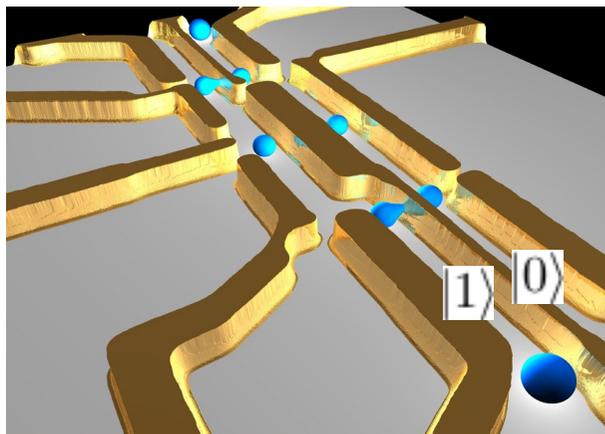
# 量子演算回路

- Time-bin量子ビットを2経路干渉計のwhich-path量子ビットに変換
- Time-binのまま計算を行う演算回路も並行して開発中
- 単一波束の読み出し手法の開発にも取り掛かっている  
(数年を目処に開発)



# Which-path量子ビット

- 電子がどちらの経路に存在するかによって量子ビットを定義
- 単一の伝導モード(量子的に許される伝導状態を一つに絞ったもの)から構成される干渉計を実現
- 電子間相互作用を利用して量子もつれを生成できることを確認
- 電子波束の利用によって、干渉の可視度が大幅に改善することを確認



## 想定される用途

- 本技術は、量子コンピューター構築のために必要なハードウェアや制御技術への要求を大幅に低減させ、量子コンピューターの普及に大きな役割を果たすと考えられる。
- 半導体の高速制御によって緩和の少ないキャリアを生成・制御する技術は、量子コンピューター以外にも応用できる可能性がある。

# 実用化に向けた課題

- 現在、実験室レベルでの基礎的な原理確認が進み、本量子コンピューターが有望であると確信できるところまでは来ている。まだ高い性能を示す数字（量子演算の忠実度など）は出せていない。
- 今後、高忠実度の量子演算などを実現するとともに、量子性を定量的に評価し、それを基に大規模量子計算が可能な量子演算回路をデザインする。
- **実用化に向けて**、大面積のデバイスを作成し、それを高速（できれば40GHz）で制御する必要がある。

## 企業への期待

- 大面積のデバイスの作成では、プラットフォームの自由度がある一方で試料の均一性が必要であり、産業界のデバイス作成技術が有効であると考えている。
- 本量子コンピューターでは、デバイスの精密かつ高速な（～数10GHz）電気操作が必要である。特に、チャンネル間のdelayをpsオーダーの再現性で制御する必要がある。これを数100チャンネル用意できれば、大規模量子計算実現の可能性が高まる。
- 上記の技術を持つ、企業との**共同研究**を希望。

# 本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : QUANTUM COMPUTER
- 出願番号 : PCT/JP2023/025244
- 出願人 : 理化学研究所、産業技術総合研究所、  
仏CNRS
- 発明者 : 山本 倫久、高田 真太郎、  
Christopher Bauerle

# お問い合わせ先



**株式会社理研鼎業** (りけんていぎょう)

新技術説明会事務局

Email: [senryaku@innovation-riken.jp](mailto:senryaku@innovation-riken.jp)