

2024年3月27日

ムーンショット目標6 公開シンポジウム

# 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

沖縄科学技術大学院大学 (OIST)

高橋優樹

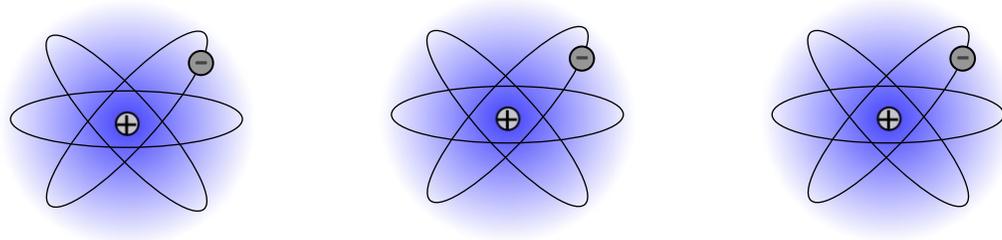
# 本日の発表内容

---

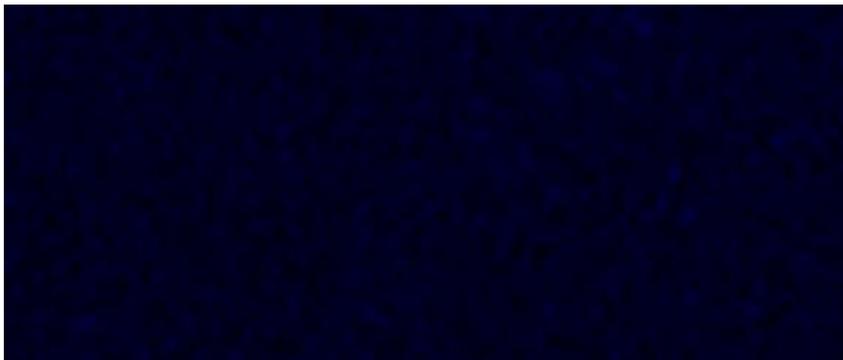
- 研究の背景
- 課題・進捗紹介
- まとめと展望

# 原子を使って量子コンピュータを作る

- 原子を一つ一つが量子ビット。  
それらを並べて量子コンピュータとする。



- それを実現するのがイオントラップ！

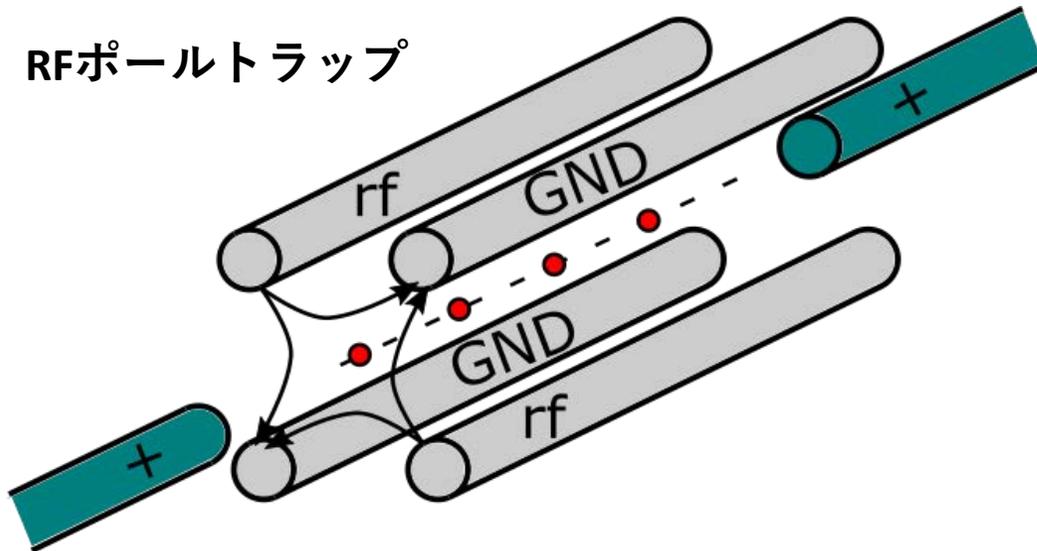


中性原子との違い：  
トラップの堅牢性  
(温度換算で $\sim 10^6$ 倍)

# イオントラップ：原子を並べる装置

- イオン→帯電した原子
- なぜイオンか→電氣的に運動を制御可能
- レーザー冷却→ $\mu\text{K} \sim \text{mK}$ 温度に冷却可
- 真空中に浮遊→環境からの隔絶→高い量子コヒーレンス

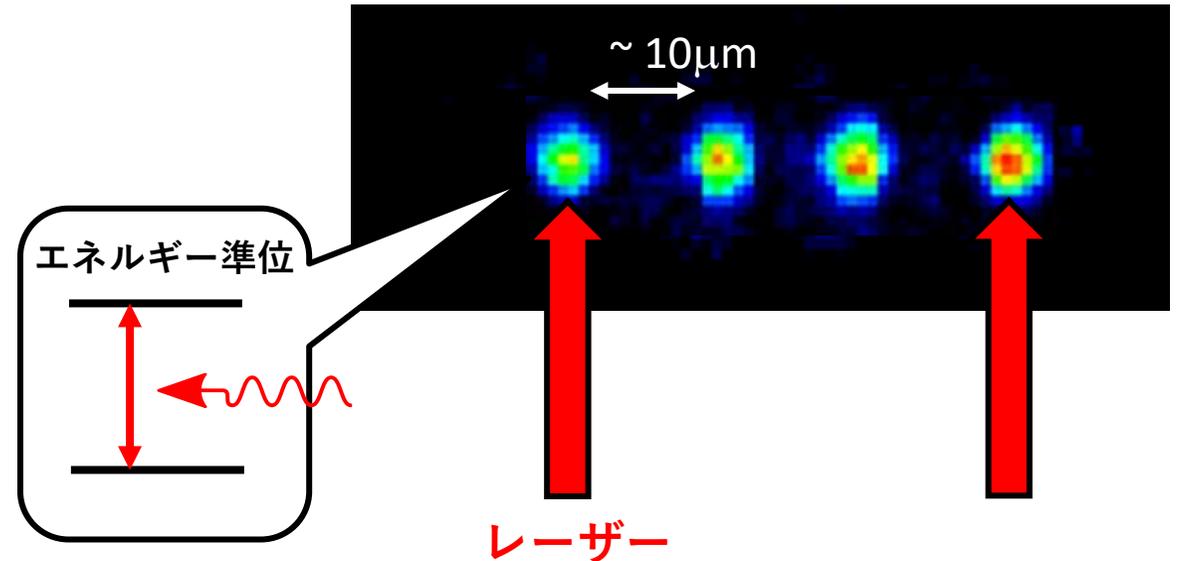
RFポールトラップ



適切に電極に**電圧**を印加することで複数のイオンを**一直線状**にほぼ**静止状態**で閉じ込めることが可能

# イオンの量子状態の操作

- 個別イオンに**レーザー**等を照射して量子ビットをコントロール
- **集団運動**の量子状態を経由して**任意のイオン間**に量子もつれ生成



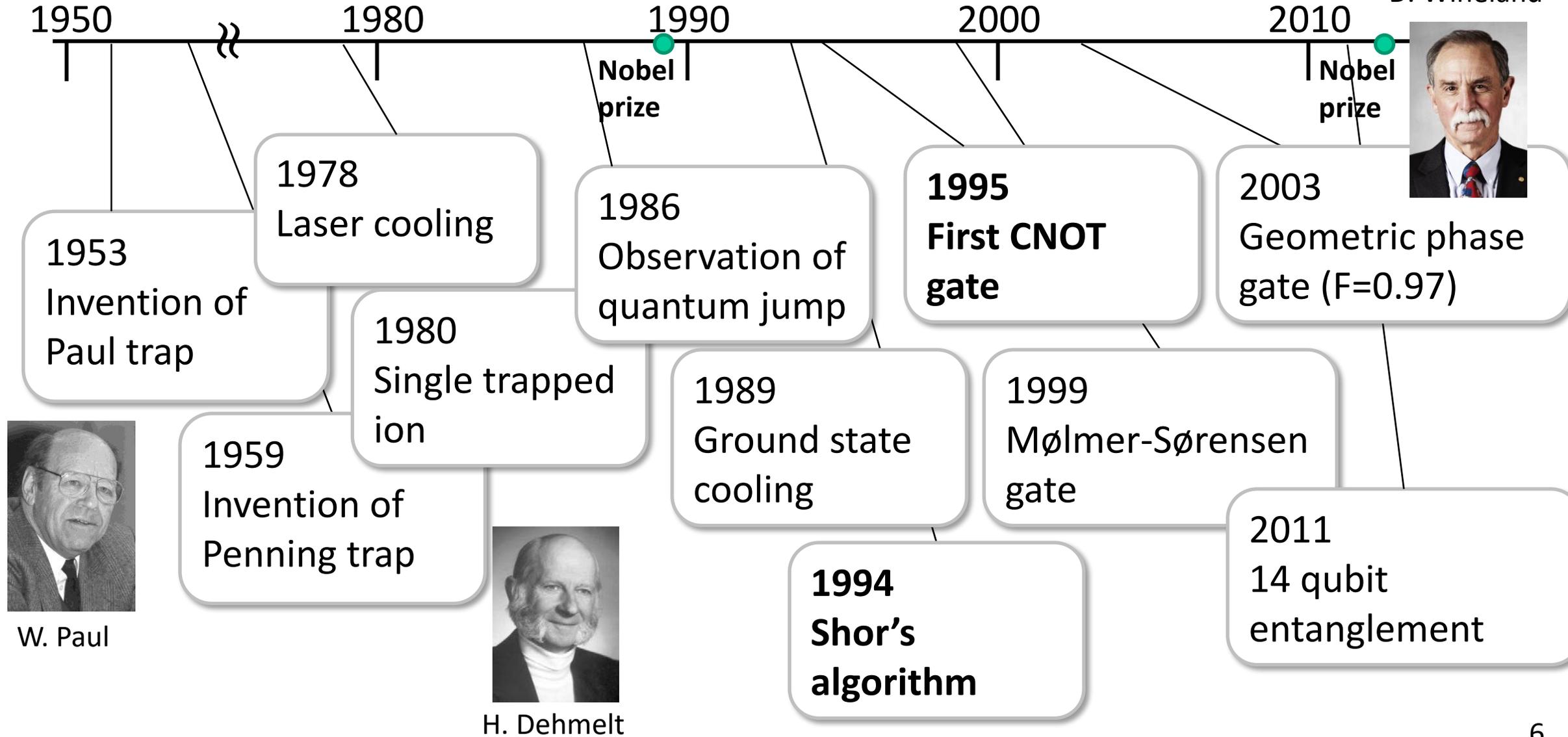
利点：

- 高い**コヒーレンス**
- 原子レベルの**均一性**
- **全結合性**

欠点：

- 量子操作の**速度**
- 量子ビット数の**拡張性**

# イオントラップの歴史



# イオントラップ量子コンピュータ開発状況

- **すべての基本構成要素が高い精度で実証済み**

- 1量子ビットゲート・・・ $F=99.9999\%$
- 2量子ビットゲート・・・ $F>99.9\%$
- 状態準備&測定・・・ $F>99.9\%$

PRL 113 220501 (2014), PRL 117, 060504 (2016), PRL 117 060505 (2016).

- **IonQ、Quantiumなどの民間企業の参入。クラウド提供。**

- **量子ビット数**

- 現状：32イオン(Quantium H2)、32イオン (IonQ Forte)
- **単一のイオントラップでイオン数を増やすと振動状態の制御が困難に**
- 現在の技術の延長では不可能→複数のイオントラップをつなぐ技術が必要

# イオントラップ量子コンピュータの課題

## 1, 単一トラップでの拡張性の限界

*TIQI Group, University of Maryland*

- 周波数混雑によるエラー増加
- ゲート速度の低下

## 2, ゲート / SPAM忠実度、速度

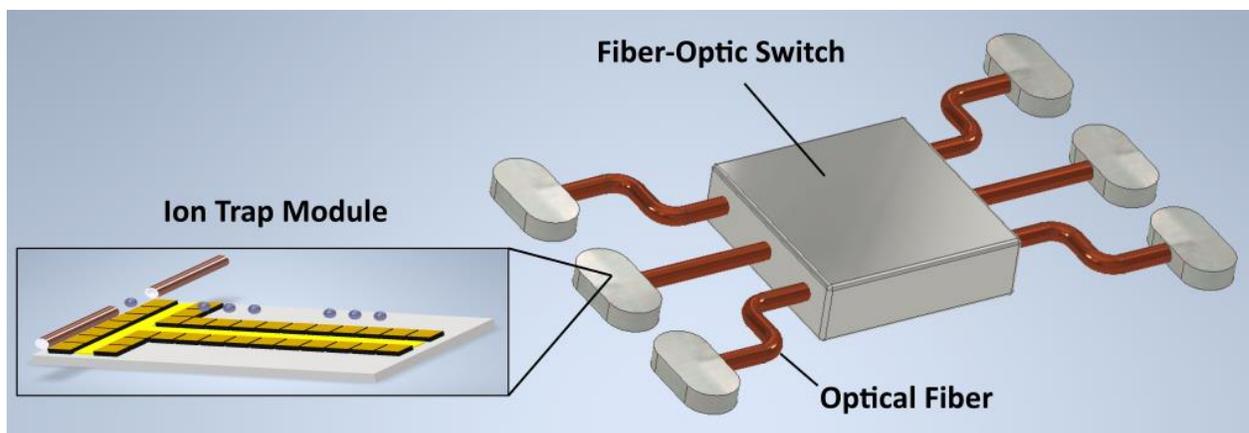
- 自然放出由来のエラー
- 消費パワーの問題

*PRL 117 060504(2016).*

## 3, 装置の小型化、簡便化、真空度

- 空間光学系の排除
- 安定性
- 真空度の向上
- 低温化

## 光接続型イオントラップ量子コンピュータ



既存技術で大規模化を図るのではなく、**分散型時代**を見据えて、必要な技術を先どって開発する。

1. 遠隔イオンを光を使って相互接続  
**(量子光接続)**
2. 各イオントラップで実現する  
**新奇機能の開拓**  
(MWゲート、振動量子、リドベルグイオン)
3. **モジュール性の向上**  
(微細加工トラップ作製技術、光回路集積化)

# 課題構成

**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**

課題推進者：高橋（OIST）、長田（東大）

**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**

課題推進者：野口（東大）

**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**

課題推進者：豊田（阪大）

**研究開発項目 6 :ジャンクショントラップを用いた  
捕獲イオンの配列技術**

課題推進者：長谷川（東大）

小芦PJとの協働（武岡、鈴木PI）

**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**

課題推進者：早坂（NICT）、鳴海（QST）、杉山（京大）

**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**

課題推進者：豊田（阪大）（田中（阪大））

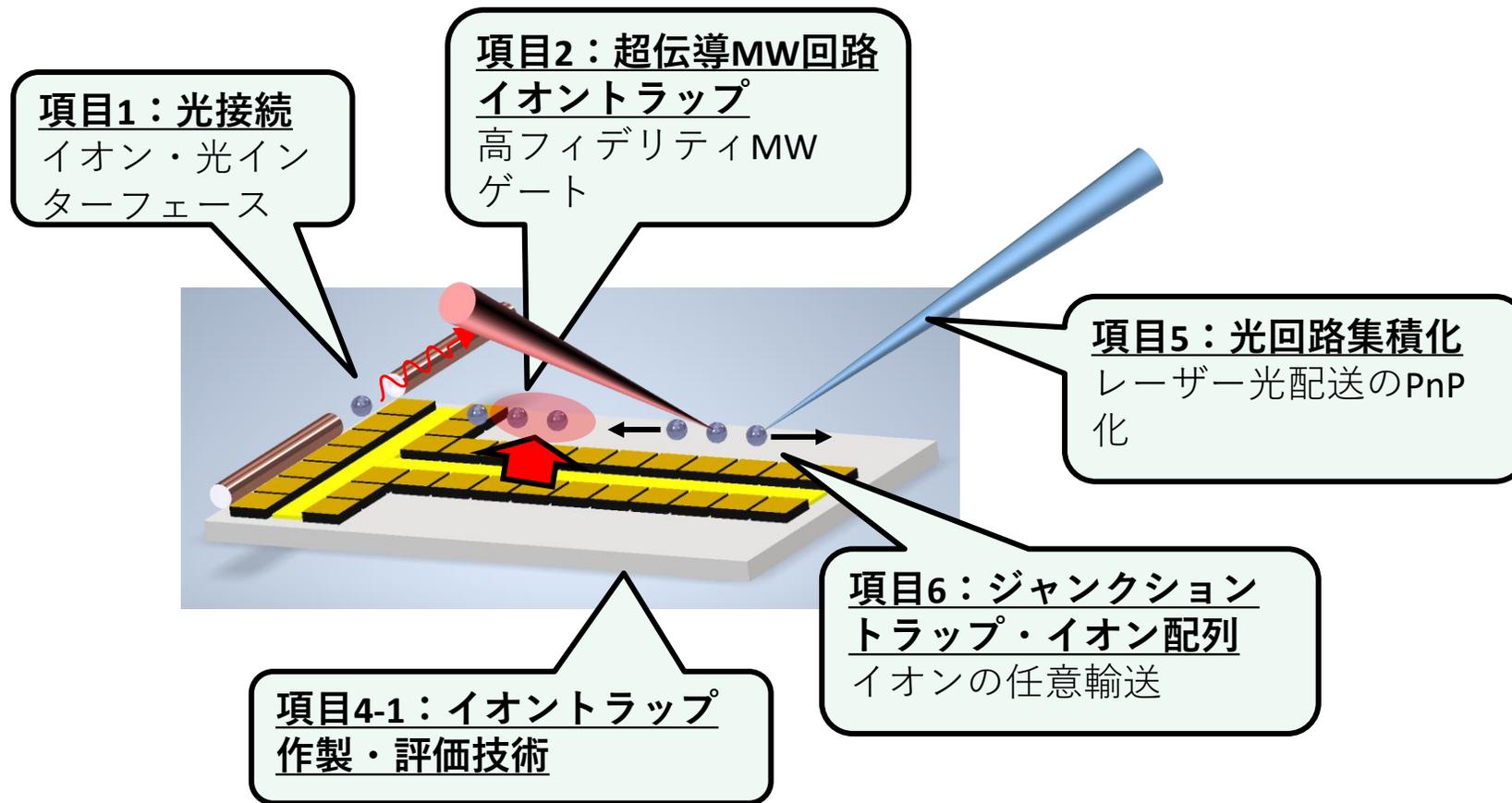
**研究開発項目 5 :イオントラップのための光回路  
集積化**

課題推進者：横山（九大）、長田（東大）

**研究開発項目 7 :リドベルグイオンー原子混合系  
の研究**

課題推進者：土師（阪大）

# イオントラップモジュールの青写真



## 探索的テーマ

- 項目3：振動量子・GKP誤り訂正
- 項目7：リドベルグイオン・原子

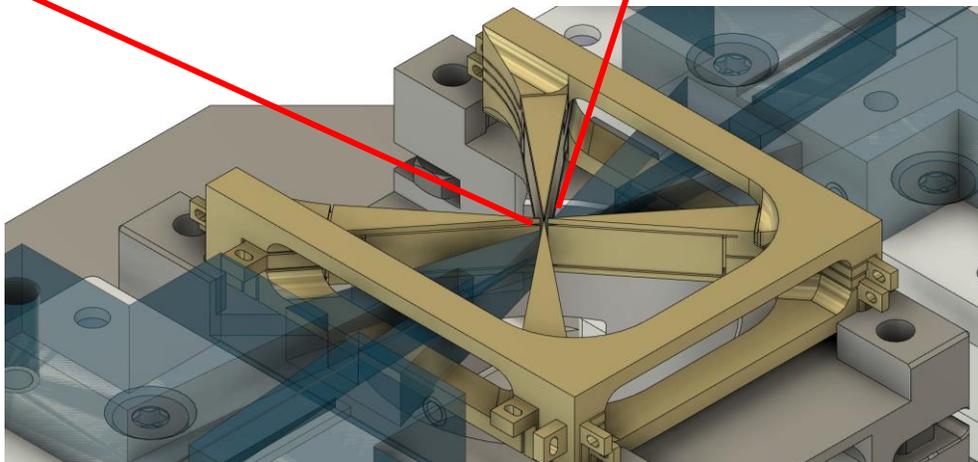
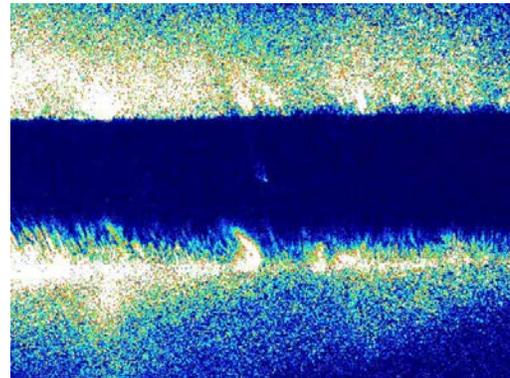
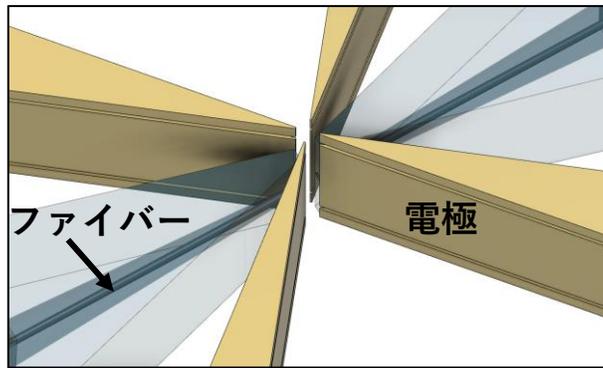
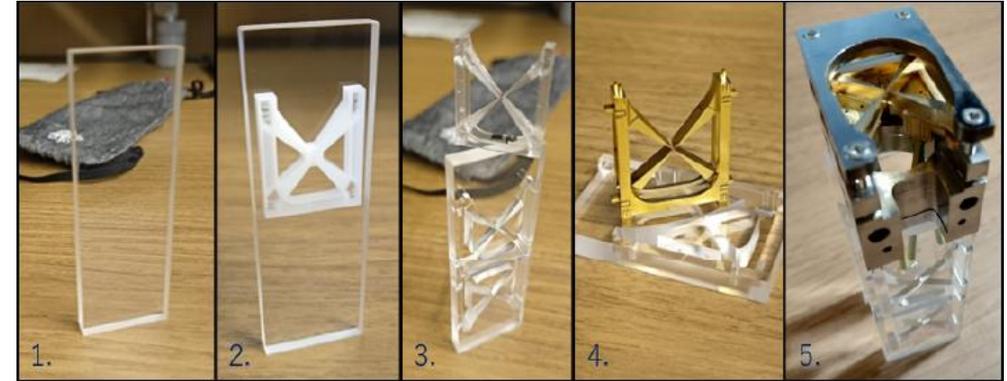
## 社会実装に向けて

- 項目4-2：クラウド化基盤技術

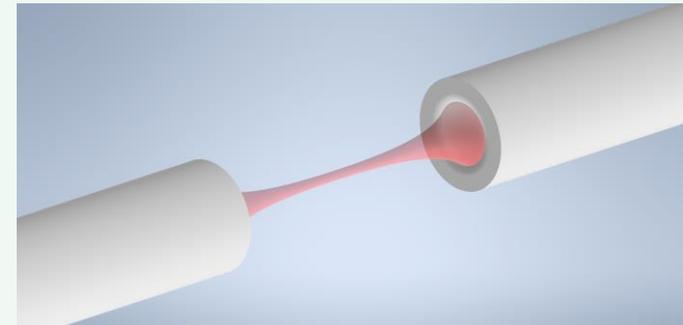
# 各課題の紹介・進捗

# 課題1-1 イオントラップの量子光接続に関する研究開発 (OIST 高橋)

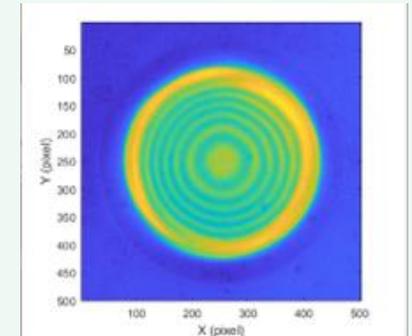
- 微小光共振器を内蔵可能なイオントラップを設計
- 超短パルスレーザーを使った**ガラスの3Dプリンティング**を用いたトラップの作製
- $\text{Ca}^+$ イオンのトラップに成功



## ファイバー式光共振器の作製

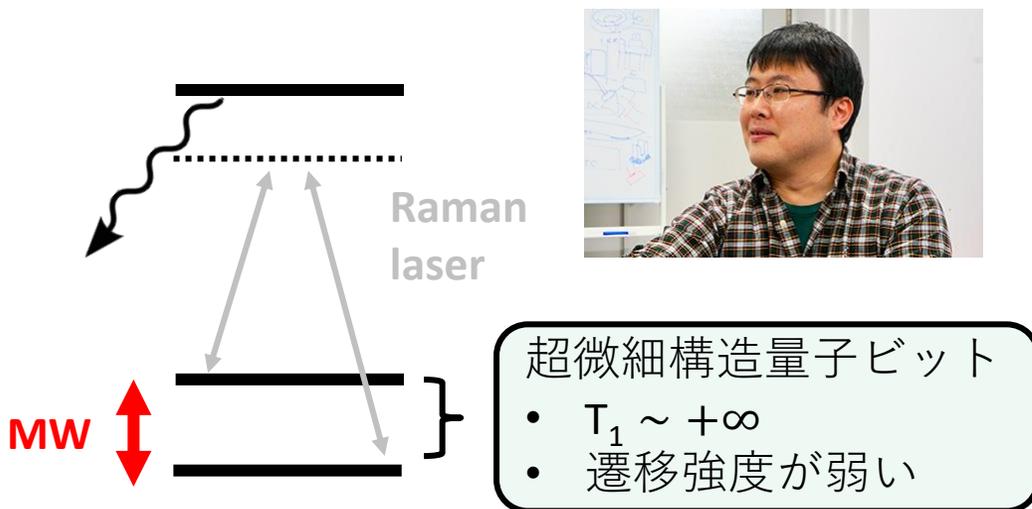


光ファイバー端面をミラー化した微小共振器



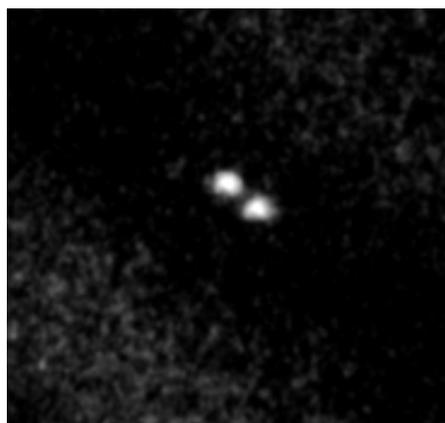
ファイバー端面をCO2レーザーで加工

## 課題2-1 超伝導マイクロ波回路を用いたイオントラップの開発 (東大野口)



- マイクロ波直接駆動により自然放出由来のエラーを排除  
→ゲートの高フィデリティ化
- 超伝導マイクロ波共振器により低パワーで高強度の磁場勾配生成  
→ **高速高精度の量子ゲート**
- 低電力化により**低温環境**での動作可能に

**秘匿  
新技術**



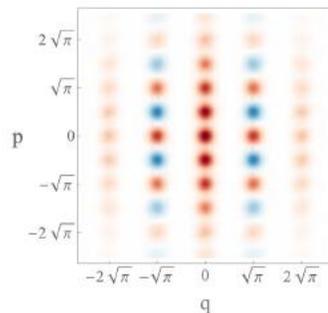
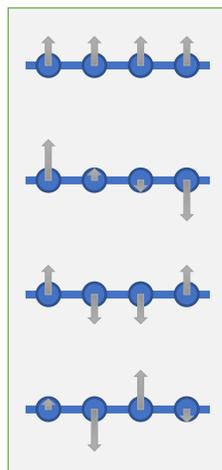
**RF電力 3 mW (従来~W) で  
Sr<sup>+</sup>のトラップに成功!  
世界一低パワーのイオントラップ**

- 低電力化によるイオン加熱の減少
- 低温による超伝導回路の性能発揮

# 課題3-1: 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 (阪大 豊田)

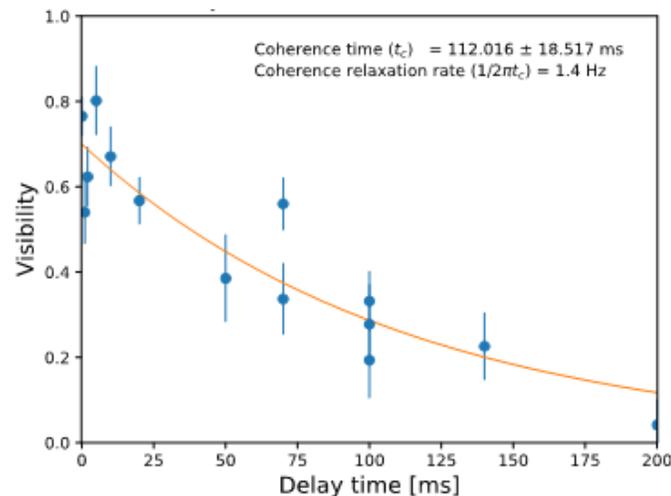


イオン配列の  
集団振動モード



GKP状態

ラムゼー干渉測定結果



軸方向モードフォノン  
(振動量子)  
のコヒーレンス改善

**9ms → 112 ms**  
**10倍以上改善!**

調和振動子の**無限次元自由度**に量子ビットを埋め込む

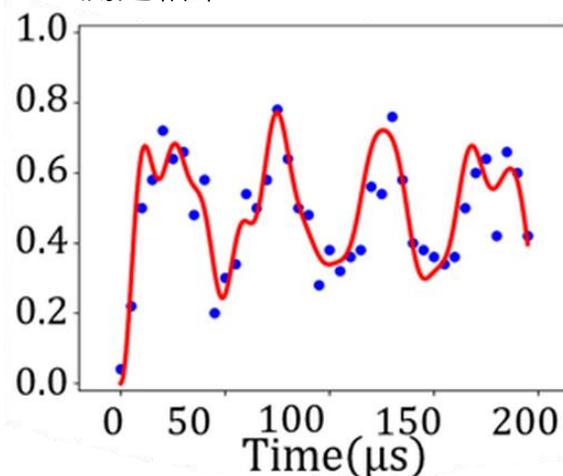
→ **ボゾニックエンコーディング**

単一量子ビットで誤り補正可能

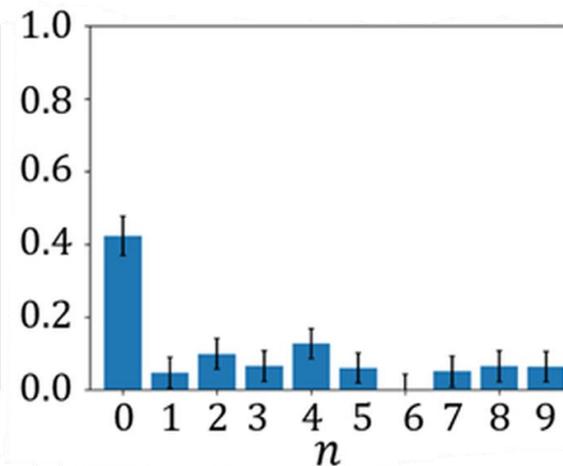
→ 誤り訂正のための**リソース削減**

**複数振動モード**を利用した多重化

ブルーサイドバンドラビ振動  
測定結果

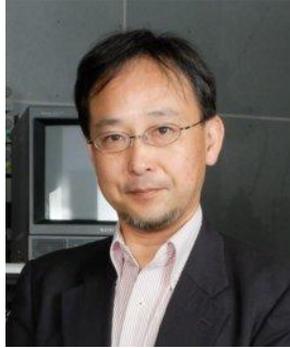


振動量子数の推定



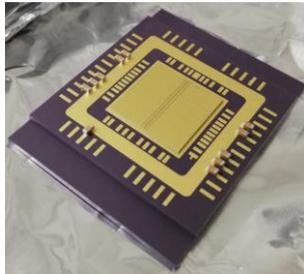
熱浴エンジニアリングによる  
**振動スクイーズド状態**  
の生成

# 課題4 - 1 - 1:高性能イオントラップ作製・評価技術の研究開発 (NICT 早坂)

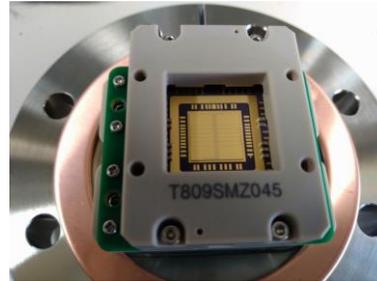


## 平面型イオントラップ

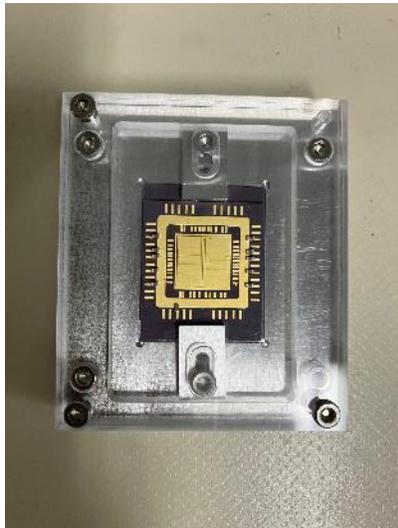
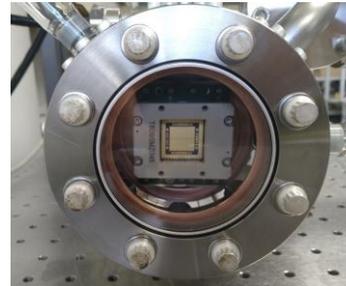
大阪大学、QST、京セラ、SDKとの協力で開発



LGA (京セラ)



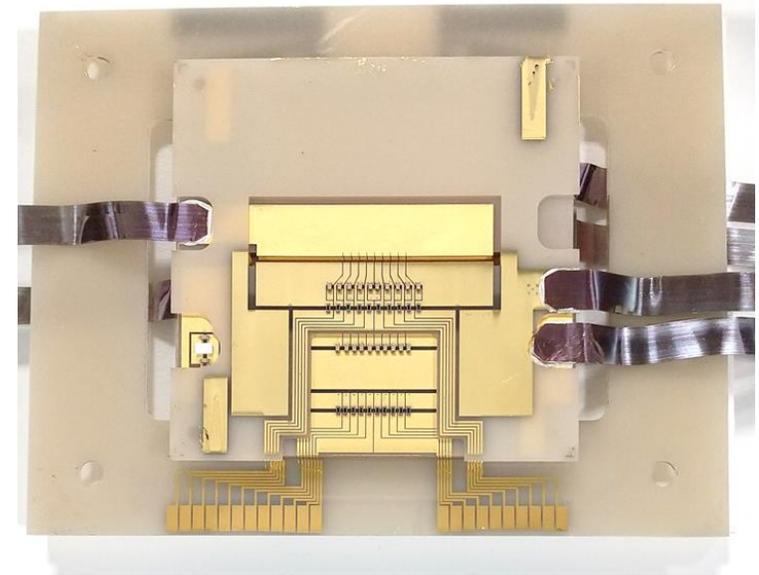
ソケット (SDK)



阪大田中Gで組み立て・配線  
→東大長谷川Gへ輸送済



## 立体型イオントラップ



- メッキプロセスの改善→レジスト残渣減
- はんだリフロー・オゾン洗浄によるチップ部品実装最適化
- ビア部に導電性エポキシ埋め込み
- 現行バージョンで供給可能

# 課題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 (阪大 豊田)



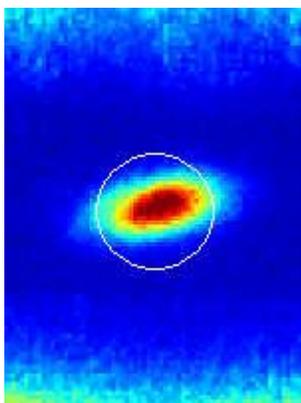
- Yb<sup>+</sup>イオンを用いて**10量子ビット**程度の量子コンピュータを実現
- **全自動化、遠隔操作**を行い、イオントラップ量子コンピュータのためのクラウド化技術基盤を確立する。



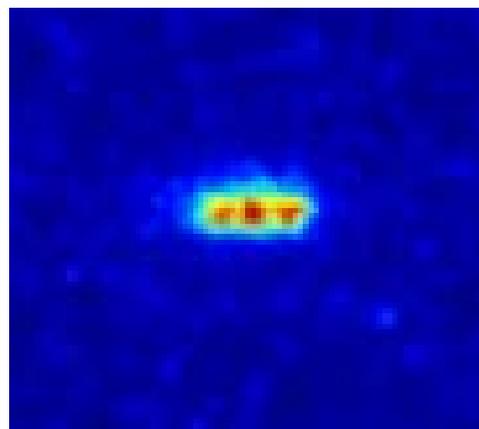
Ybイオントラップ実験系

## 今年度進捗

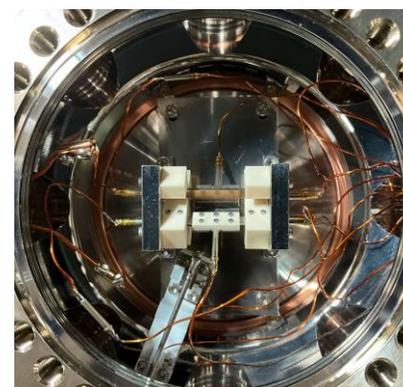
- **実験装置の組み立て完了**
- **Yb<sup>+</sup>イオンの捕獲に成功!**



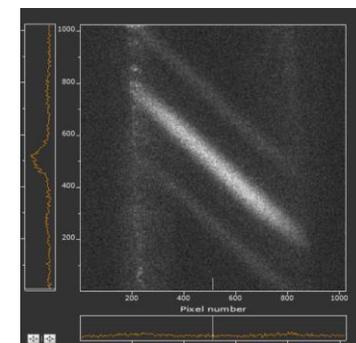
トラップされたYb<sup>+</sup>イオン  
(クラウド状態)の蛍光画像



トラップされたYb<sup>+</sup>イオン  
(結晶化状態)の蛍光画像



イオントラップ装置

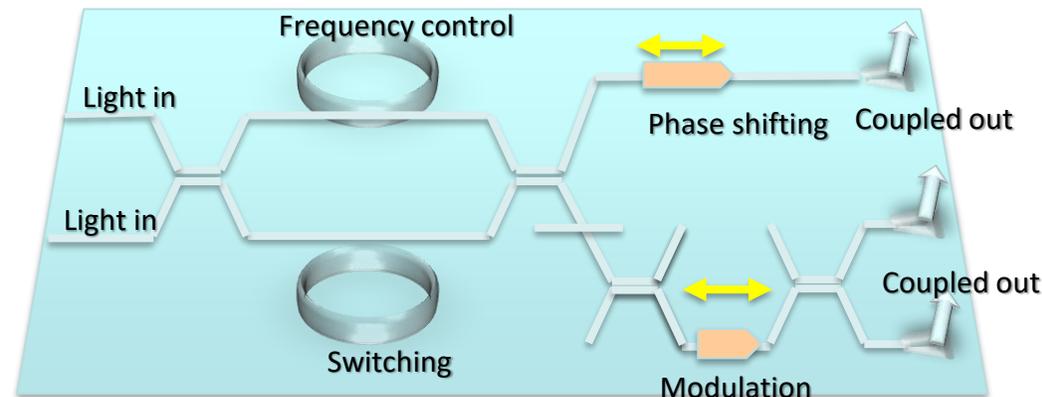
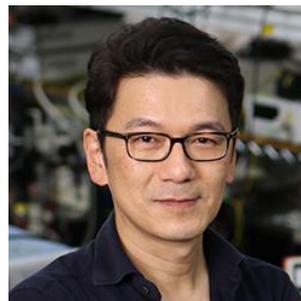


Yb中性原子ビームの蛍光

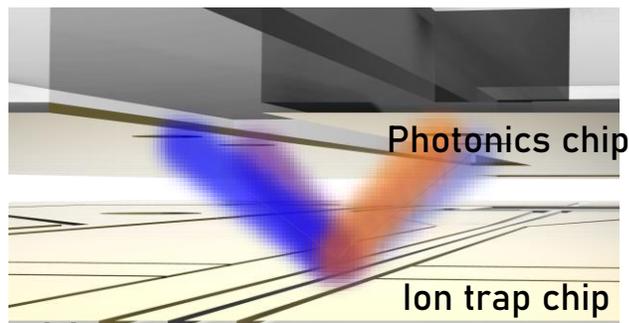
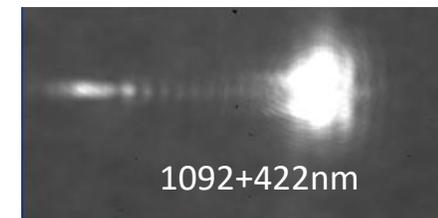
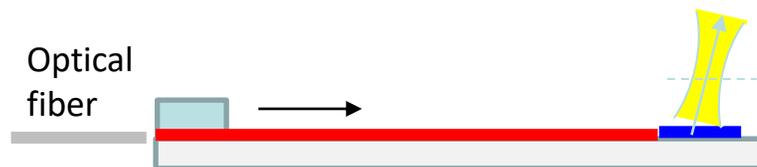
# 課題5-1、5-2: イオントラップのための集積化光回路に関する研究開発 (横山、長田)

## 集積化光回路とイオントラップの統合

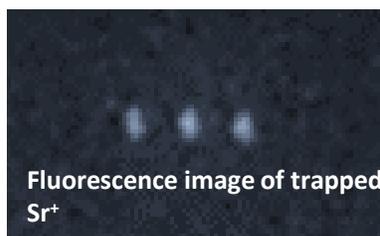
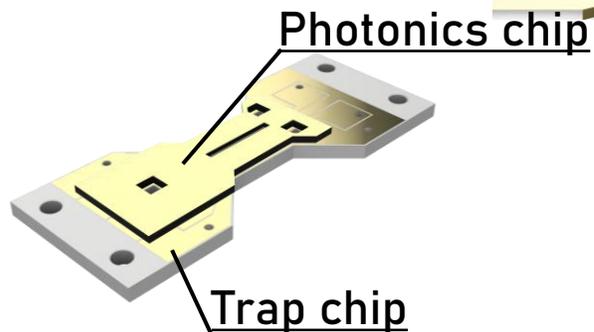
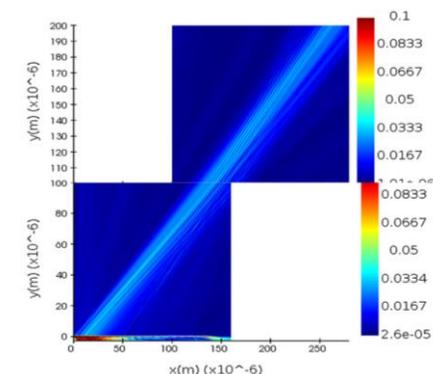
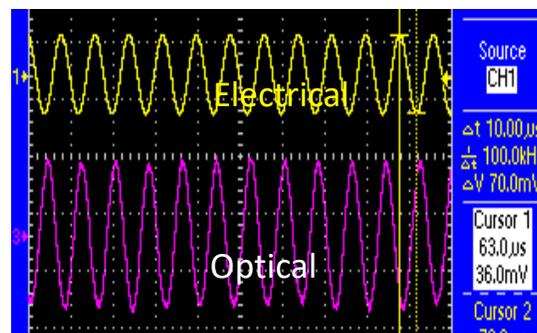
- 空間光学系を排してPnPを可能に
- 光回路のチップとイオントラップを分離。フリップチップの手法で接合。
- 九大G (横山) 作製の光回路を東大G (長田) にてイオントラップと組み合わせる



グレーティングカップラーによるビームの射出



オンチップ用位相変調器(L<8.0mm)  
(1092nm~780nm)



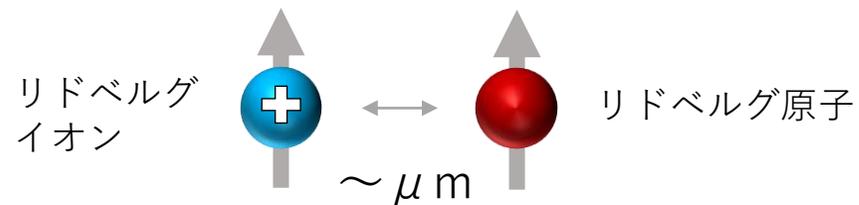
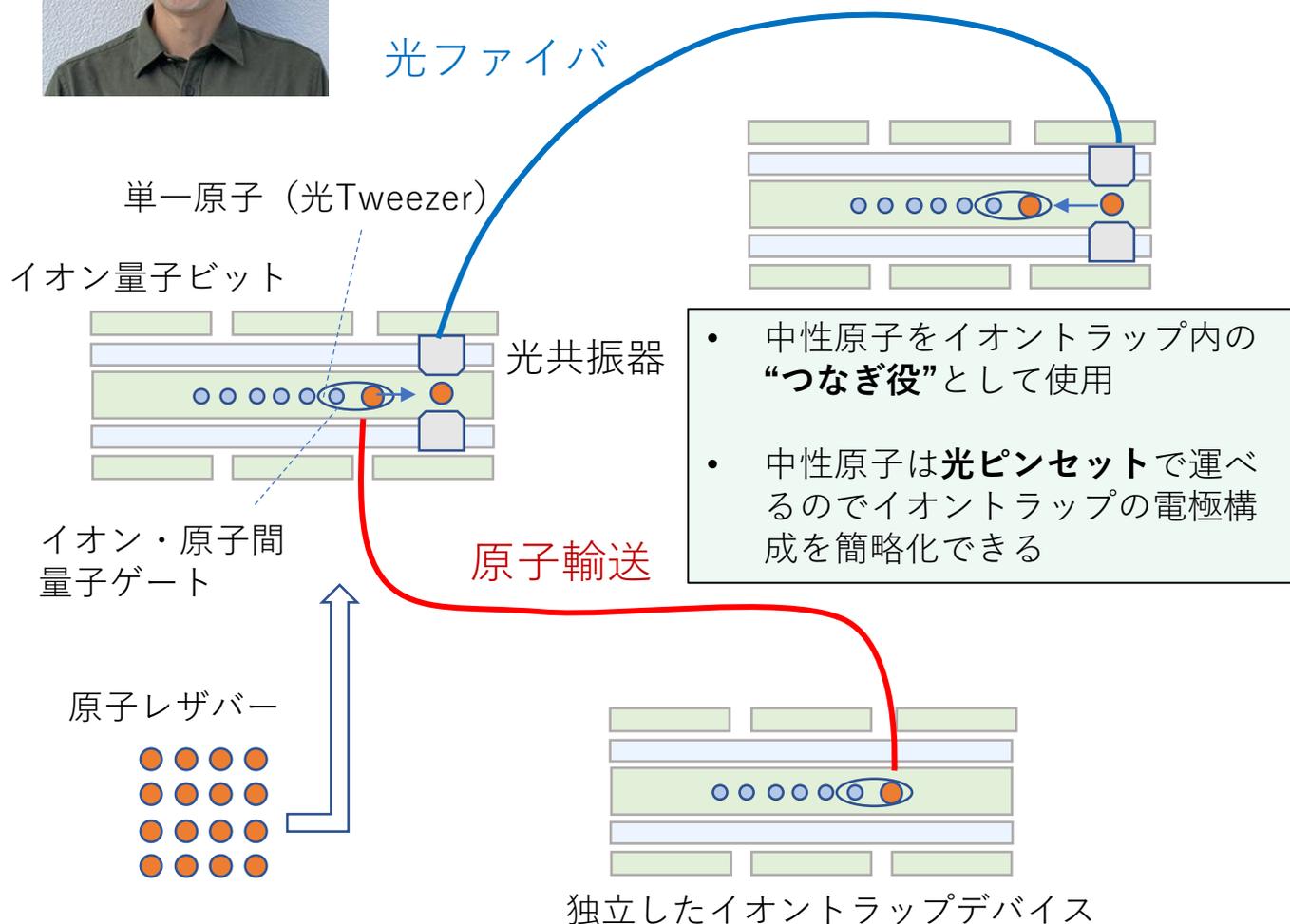
多チャンネル光集光素子を使った  
多波長レーザー集光(フォーカシング)

# 課題7-1: リドベルグ励起によるイオン・原子間の量子インターフェース開発 (土師)



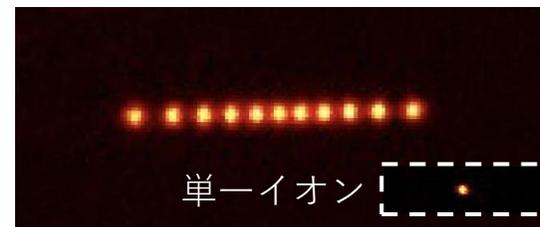
## イオン・原子の量子インターフェース

## イオンと原子のリドベルグブロッケードゲート



- イオンと原子のリドベルグ状態に準備する。
- リドベルグイオンとリドベルグ原子の**双極子・双極子相互作用**を用いて局所的な高速ゲート操作 (強い相互作用) を行う。

イオントラップ中のSr<sup>+</sup>イオン



**イオントラップ装置、中性原子トラップ装置の両者を構築し、イオン、原子の捕獲にそれぞれ成功した**

## その他の研究課題

- **課題 1 – 2** : 半導体ミラーを用いたイオン・光インターフェースの開発 (東大 長田)
- **課題 4 – 1 – 2** :  $^{171}\text{Yb}^+$ 時計遷移を用いた立体型イオントラップ評価 (京大 杉山)
- **課題 4 – 1 – 3** : Baイオンによる平面型イオントラップの評価 (QST 鳴海)
- **課題 6 – 1** : ジャンクシオントラップを用いた捕獲イオンの配列技術 (東大 長谷川)
- 小芦PJ (光接続、誤り訂正)、山本俊PJ (光検出器) との協働

ホームページ : <https://www.oistmoonshot.jp/>

## まとめと展望

- 実験装置の立ち上げが完了し、多くの課題でイオンの捕獲に成功した。
- 今後は、各課題において目標とする機能の実現を目指す。
- R6年度目標
  - 光接続：高フィネス微小光共振器のイオントラップへの導入（1-1、1-2）
  - 超伝導：超伝導回路の振動磁場勾配を用いたイオン制御（2-1）
  - 振動量子：複数振動モードにおけるスクイーズド状態の生成（3-1）
  - クラウド基盤：2量子ビットゲート、クラウドサービス制御システムの導入（4-2）
  - 光導波路：SiON系薄膜を使った多波長対応の光導波路と回折素子、光導波路一体型イオントラップによるイオンの捕獲（5-1、5-2）
  - リドベルグ：ハイブリッドトラップ装置の構築（7-1）
  - NICT立体型トラップの性能評価（4-1-2）、Ba<sup>+</sup>用平面型イオントラップシステムの完成（4-1-3）
  - 新奇なジャンクション型3次元微細加工電極の評価（6-1）