

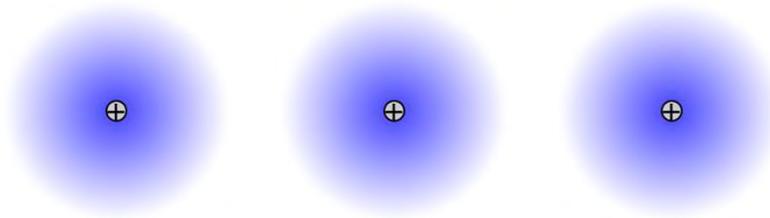
2022年3月11日  
ムーンショット目標6 公開シンポジウム

# 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

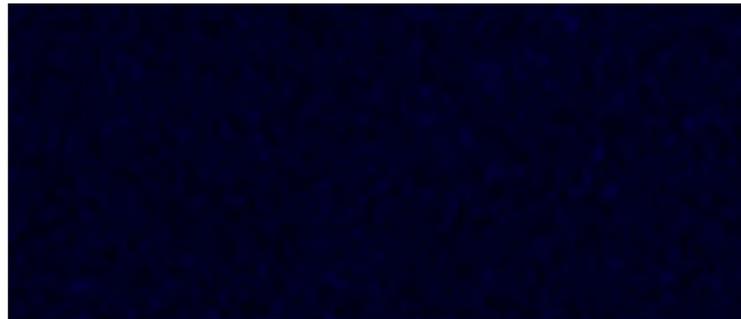
沖縄科学技術大学院大学  
高橋優樹

# 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。



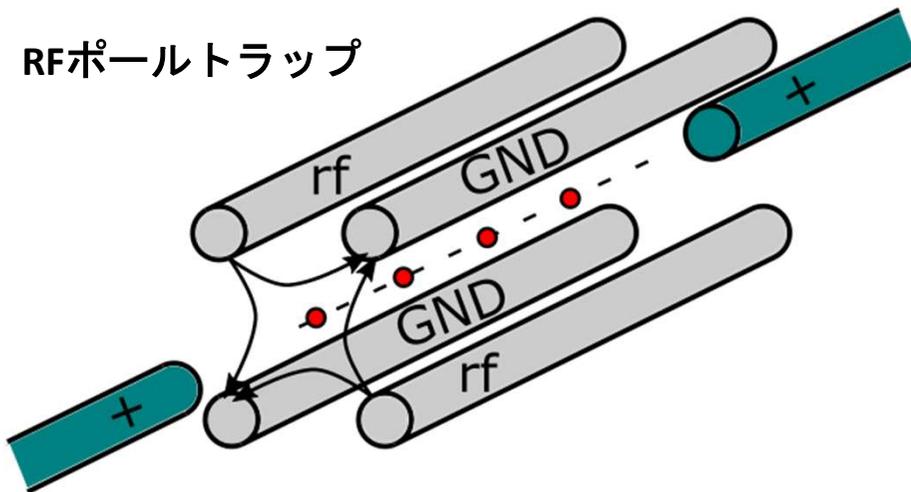
- それを実現するのがイオントラップ！



# 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

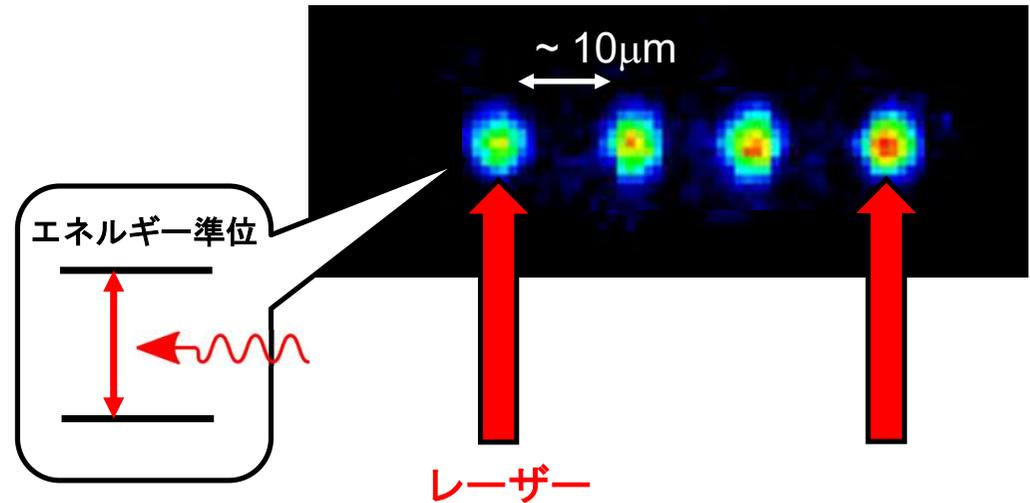
RFポールトラップ



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經由して任意のイオン間に量子もつれ生成



## 利点：

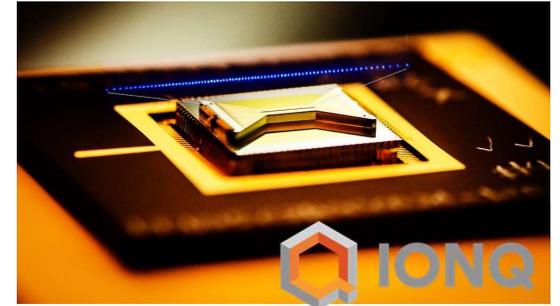
- 高いコヒーレンス
- 原子レベルの均一性
- 全結合性

## 欠点：

- 量子操作の速度
- 量子ビット数の拡張性

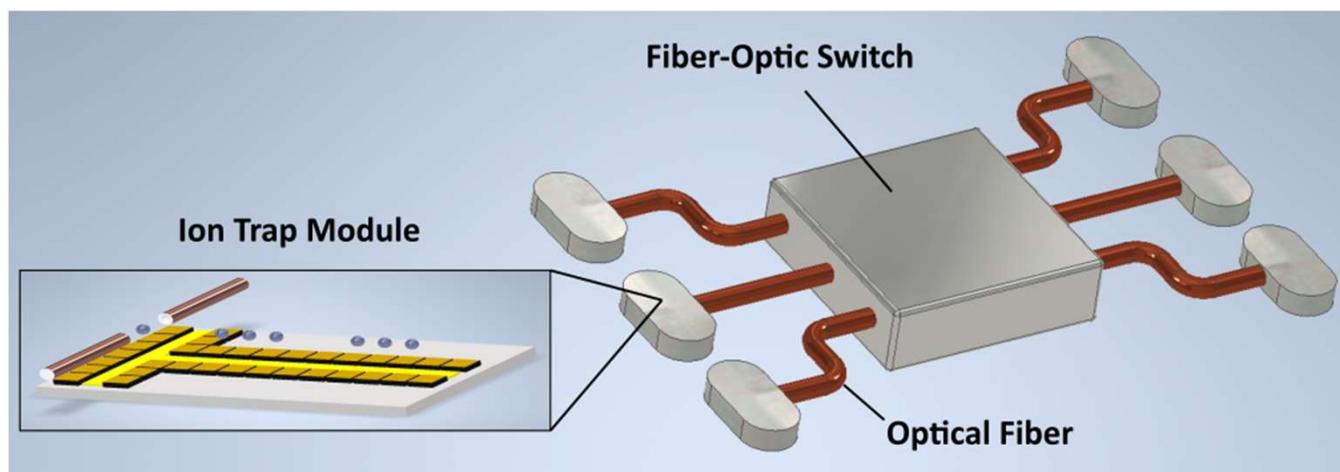
# イオントラップ量子コンピュータ開発状況

- **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・・・ $F>99.9\%$
- **IonQ、Honeywellなどの民間企業の参入。クラウド提供。**
- **課題：量子ビット数をいかに増やすか？**
  - 現状：13イオン (arXiv: 2009.11482(2020))、20イオン (PRX 8, 021012(2018))
  - 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



# 当プロジェクト基本設計

## 光接続型イオントラップ量子コンピュータ



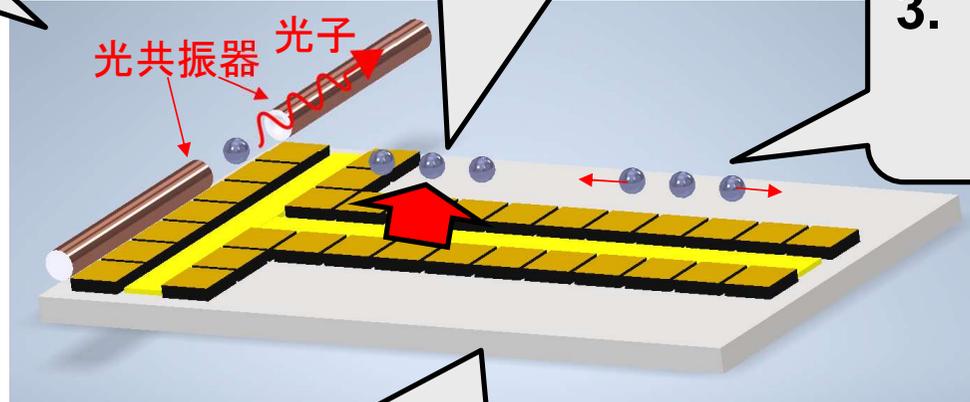
1. トラップモジュールを光を使って相互接続（量子光接続）  
→ 単一のイオントラップを超えた拡張性
2. 高機能イオントラップモジュール  
→ イオンの自由度（光、MW、振動）を使い尽くす

# 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

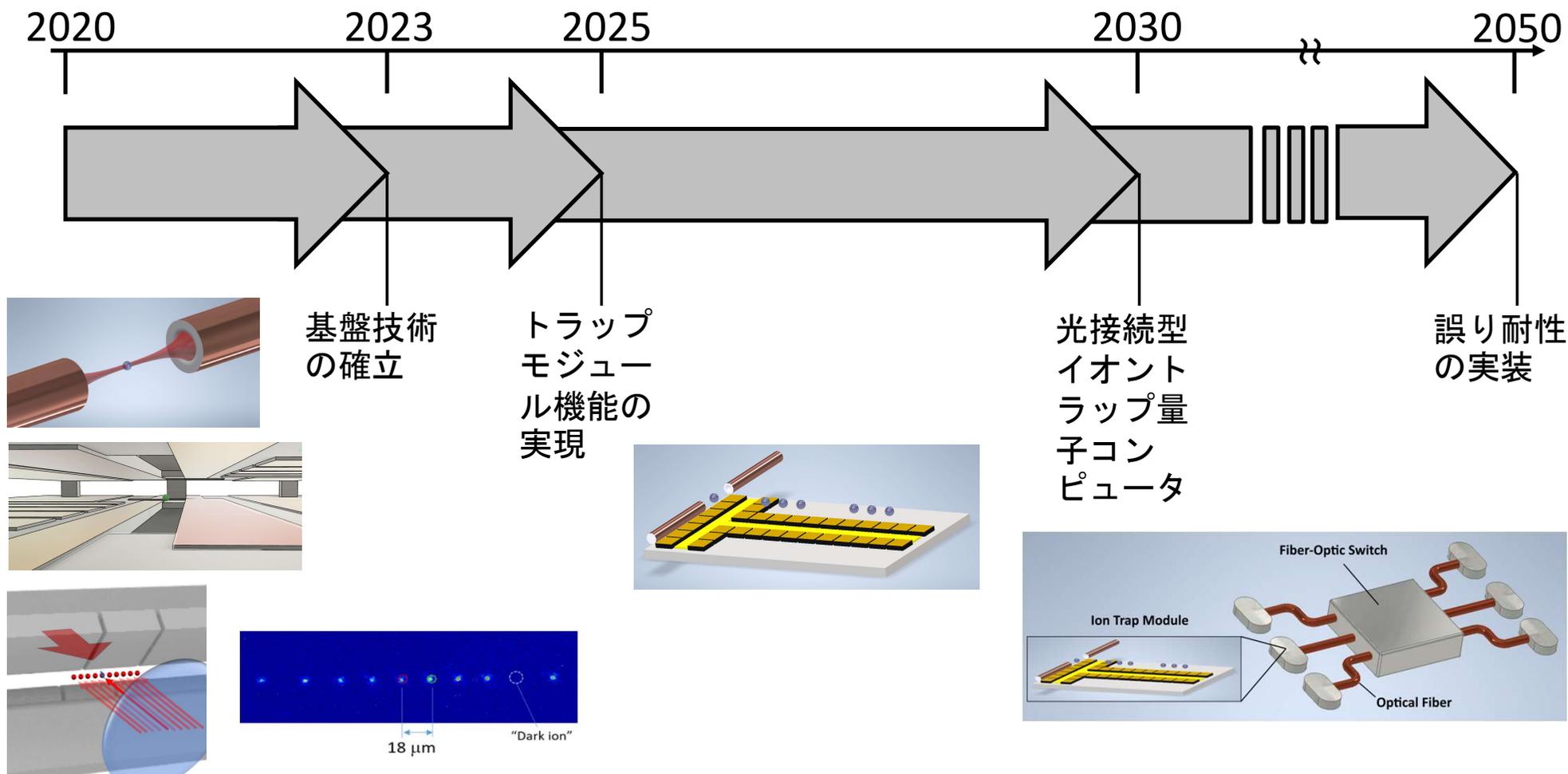
2. 超高精度・高速  
量子論理ゲート

3. 振動状態の量子  
制御と誤り訂正  
への応用



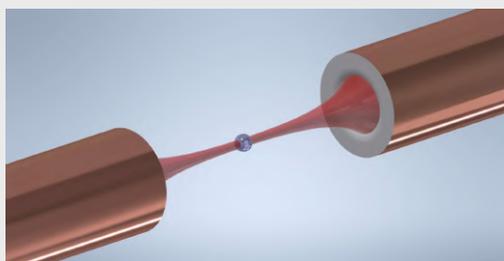
4-1. 高性能イオントラップ  
作製・評価技術  
4-2. クラウド化基盤技術

# タイムライン



# 研究開発項目・課題

## 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

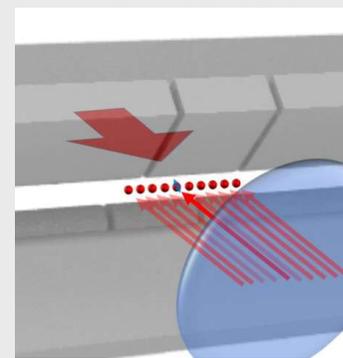


微小光共振器との結合により  
光接続効率の大幅な向上!



高橋優樹  
(OIST)

## 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

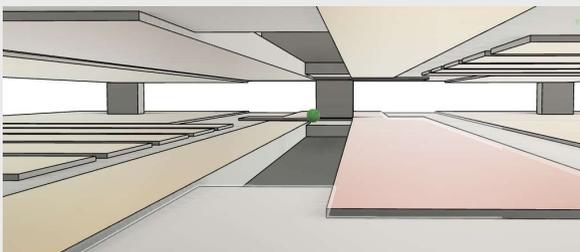


集団フォノンモードの量子制御によりボゾニック符号の実現!



豊田健二  
(阪大)

## 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



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!



野口篤史  
(東大)

## 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PJを支えるトラップ供給  
コミュニティ向け汎用トラップ

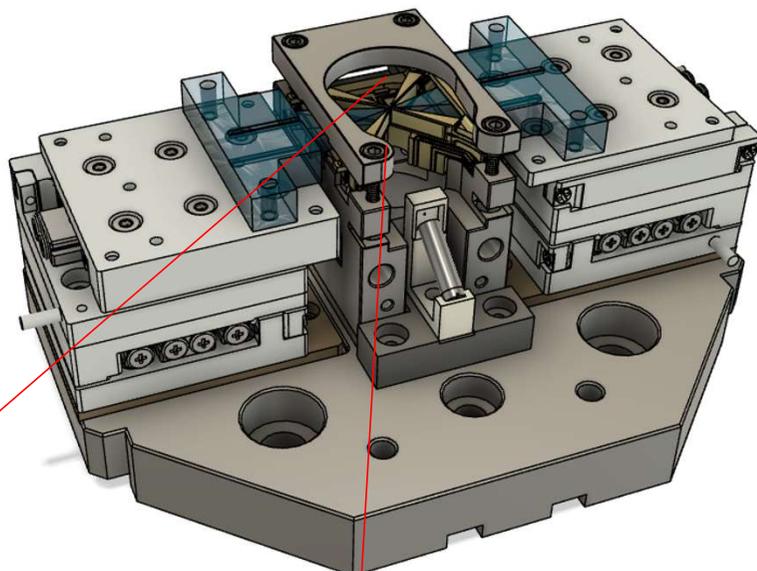
4-2. : イオントラップ量子コンピュータのクラウド化基盤技術 (豊田)

社会実装に向けた基盤技術の検証

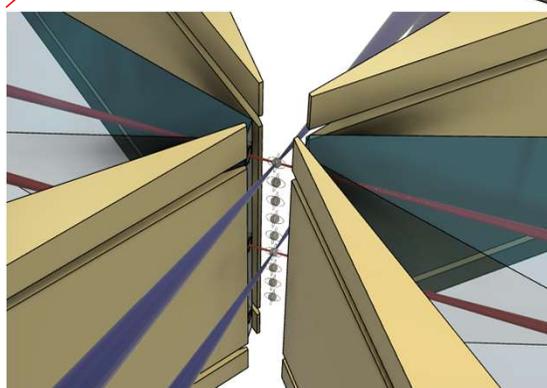
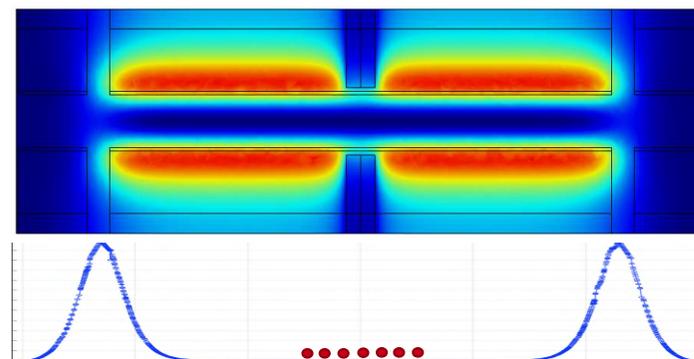


早坂和弘  
(NICT)

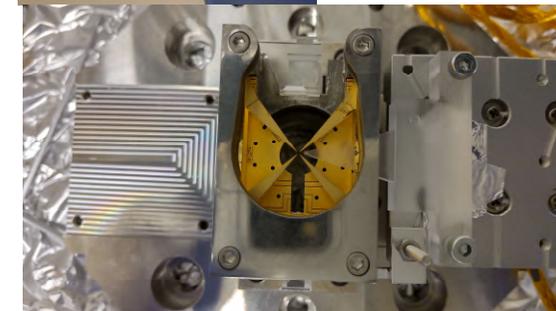
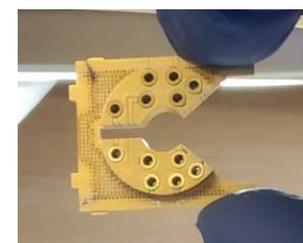
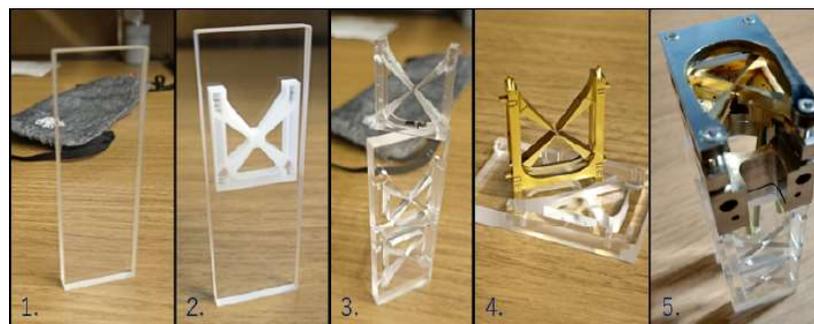
# 課題1-1：微小光共振器一体型線形イオントラップの開発



軸方向ポテンシャルの電場シミュレーション

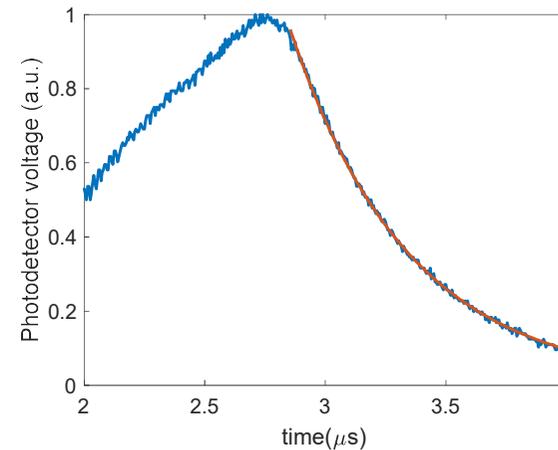
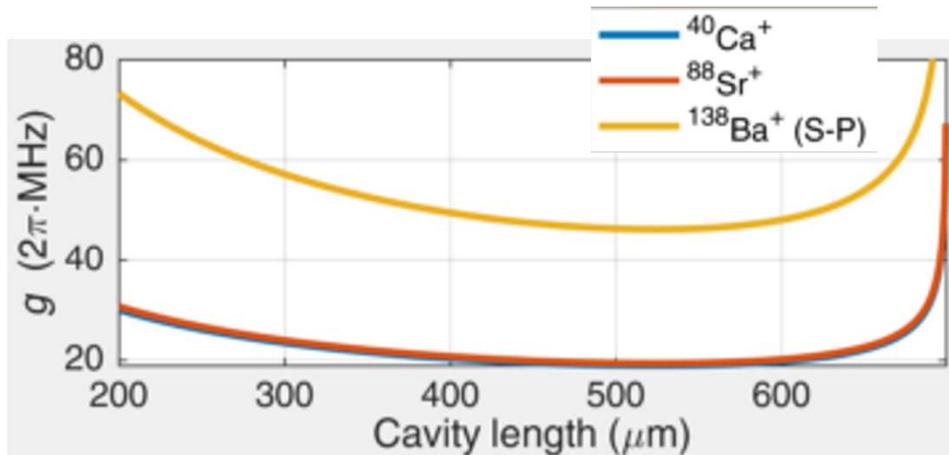


レーザーエッチングによるトラップ作製



# 課題1-1：微小光共振器一体型線形イオントラップの開発

Ba<sup>+</sup>だと結合がCa<sup>+</sup>、Sr<sup>+</sup>の2倍以上



波長493nmのための高フィネス共振器

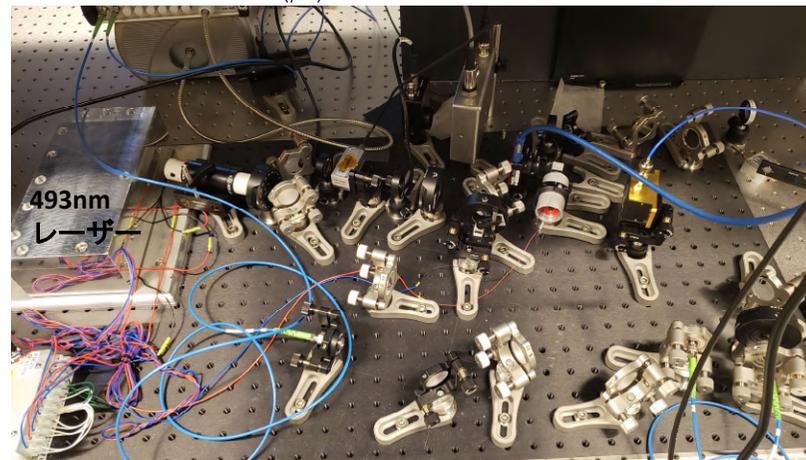
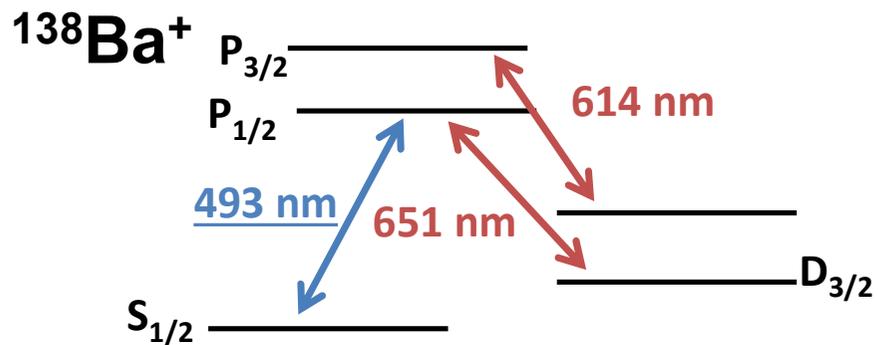
←リングダウン測定

Mean Decay time = 496.2ns (+/-6ns)

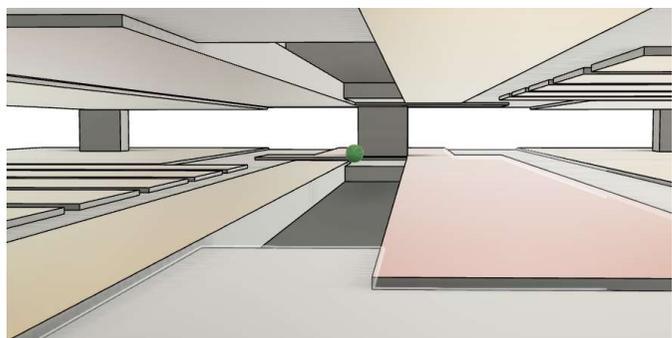
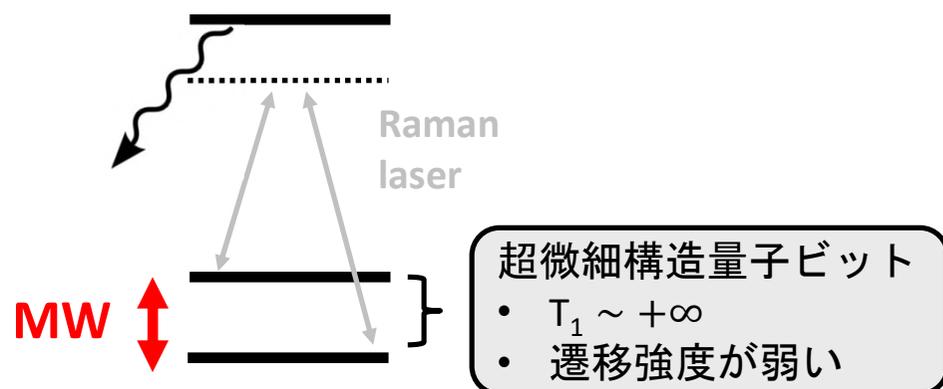
F= 29232 (+/-302)

大気圧下

→真空中で変化がみられるか？



# 課題2-1：超低振動クライオシステム および超伝導回路イオン トラップの開発

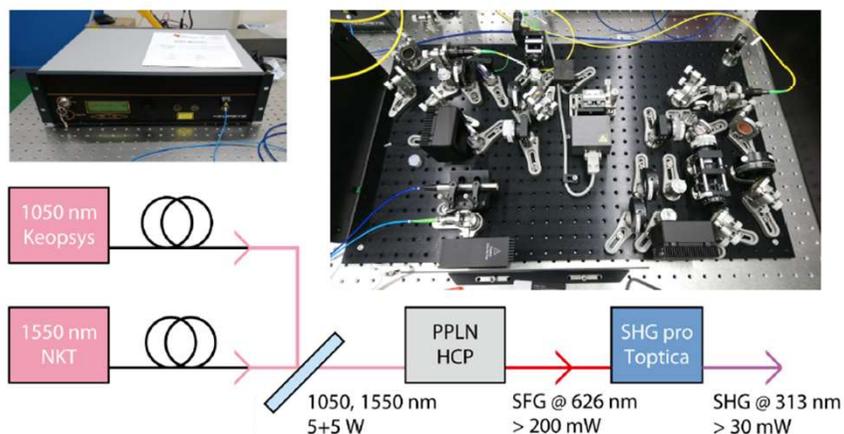


- マイクロ波直接駆動により自然放出由来のエラーを排除  
→ゲートの高フィデリティ化
- 超伝導マイクロ波共振器により低パワーで高強度の磁場勾配生成  
→ **高速高精度の量子ゲート**  
従来の1/1000のパワーで10倍速い
- イオントラップの低温下・超伝導化をさきどり
  - 低加熱レート
  - トラップ周波数の高周波化
  - SSPDの統合
- 超低振動クライオシステム @ ~4Kの開発

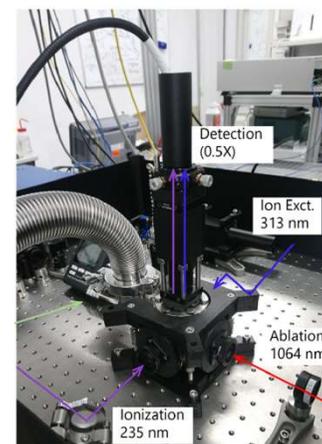
# 課題2-1：超低振動クライオシステム および超伝導回路イオン トラップの開発

## Be<sup>+</sup>イオン用レーザー

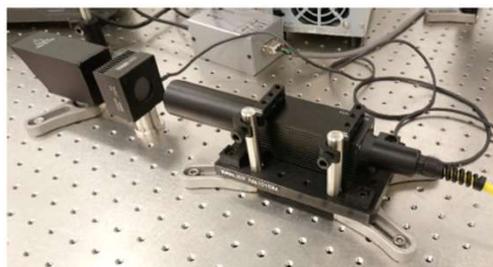
### 313 nm Cooling



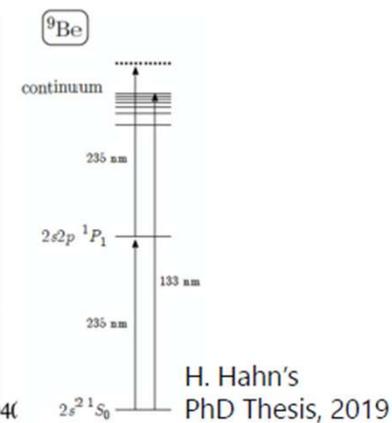
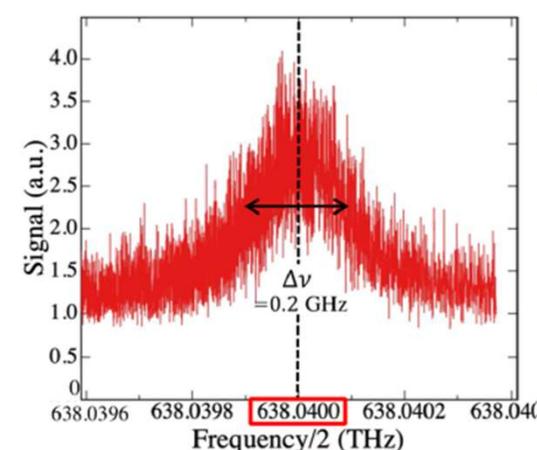
## レーザーアブレーションで生成したBe原子の分光



## アブレーション用パルスレーザー

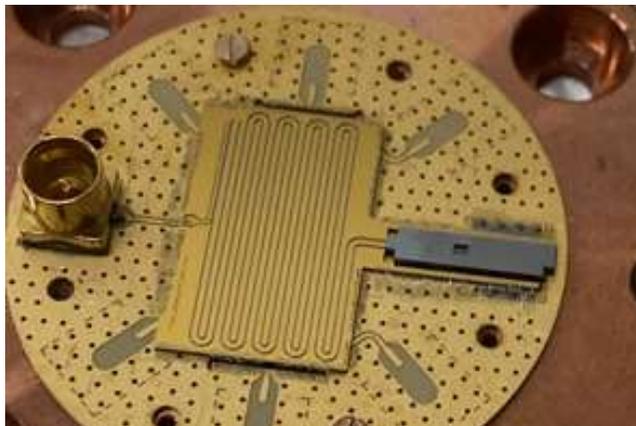
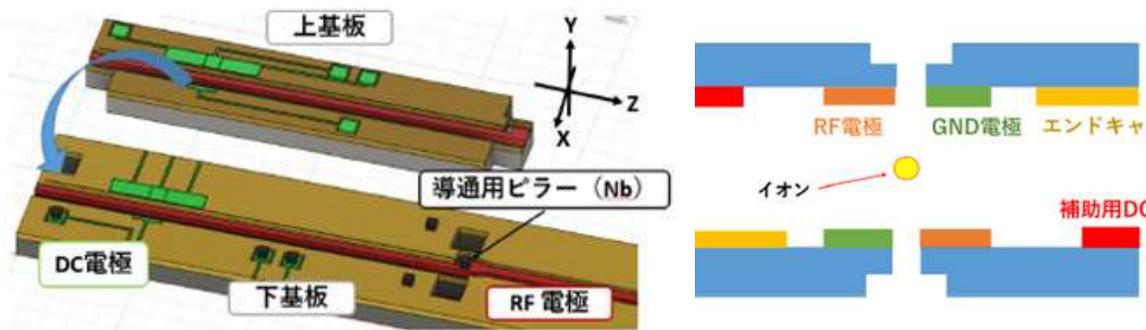


## イオン化レーザー@234 nm

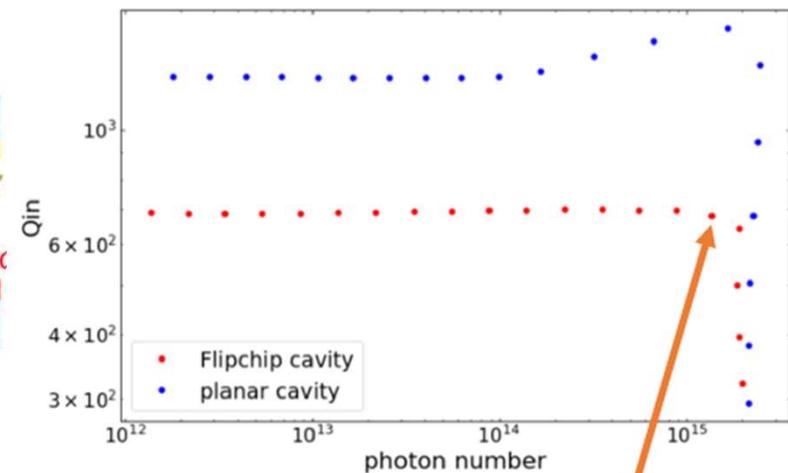


# 課題2-1：超低振動クライオシステム および超伝導回路イオン トラップの開発

## 超伝導Flip-chipイオントラップ



## 超伝導共振器の飽和現象

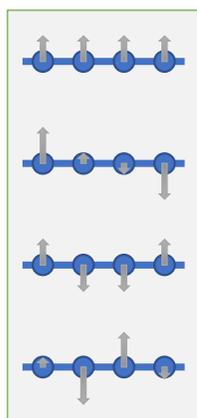


内部光子数:  $1.4 \cdot 10^{15}$   
入射強度 2 dBm = 1.6 mW

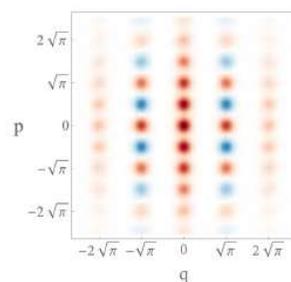
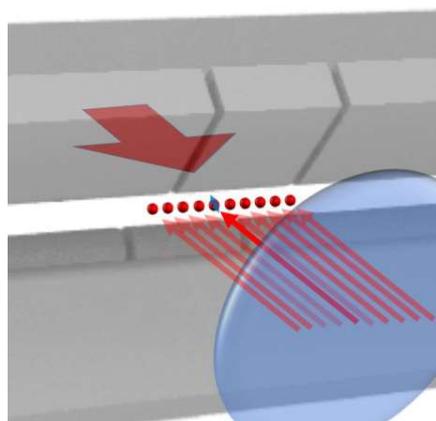
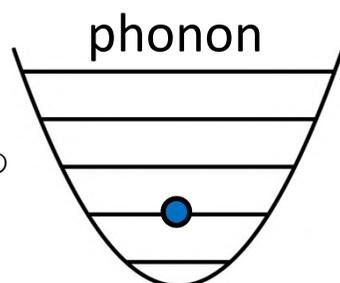
電圧振幅: 20 V

ポテンシャル深さ: 22.4 meV

# 課題3-1：振動状態の多モード量子制御と符号化への応用に 関する研究開発



イオン配列の  
集団振動  
モード



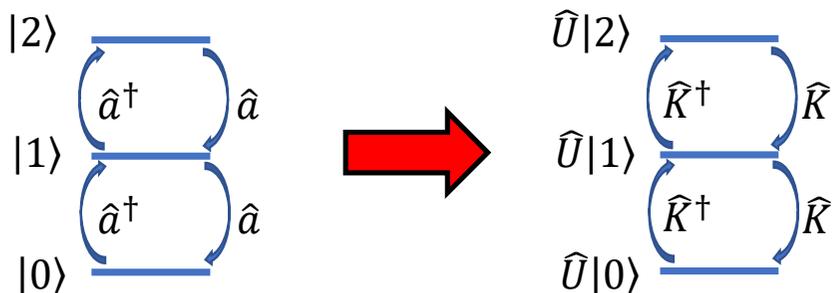
GKP状態

- 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
- 個別光アクセスによる複数の集団フォノンモードの量子制御  
→ スクイーズ状態の重ね合わせ  
→ **GKP状態**
- 複数振動モードを利用した多重化

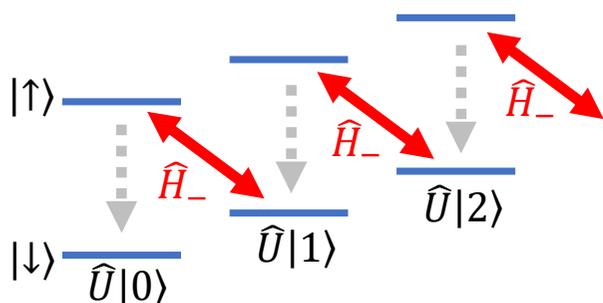
# 課題3-1：振動状態の多モード量子制御と符号化への応用に関する研究開発

熱浴エンジニアリングによるイオン振動状態の制御

$$\hat{K} = \hat{U}a\hat{U}^\dagger$$

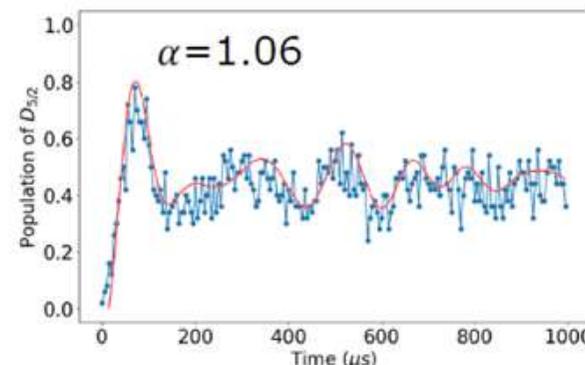


$$\hat{H}_- = \hbar\Omega(\hat{K}\hat{\sigma}_+ + \hat{K}^\dagger\hat{\sigma}_-)$$



ユニタリ変換された基底で“冷却”することで、 $\hat{U}|0\rangle$ を得る

コヒーレント状態の生成 ( $\hat{U} = \hat{D}(\alpha)$ )



単純な拡張でスクイーズド状態を生成可能

# 課題4-1 :高性能イオントラップ作製・評価技術の研究開発

## 課題概要

- プロジェクト内で使用するイオントラップの研究開発と供給
- 国内イオントラップコミュニティ向けイオントラップの研究開発と供給
- イオントラップ評価技術の研究開発

## トラップ作製技術の研究開発

- トラップ製作設備整備

マイクロマニピュレーション装置

3次元レーザー加工装置



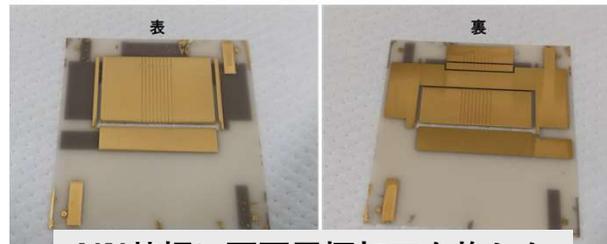
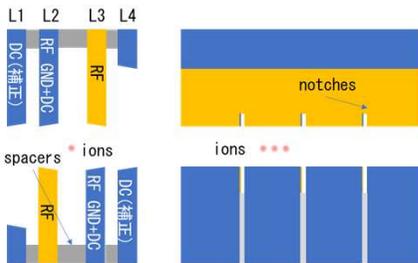
基板貼り合わせ装置



- 外部ファンドリ利用によるAIN製立体型トラップ製作

設備整備と並行して外部ファンドリ利用+プロセス内製でトラップ試作を実施

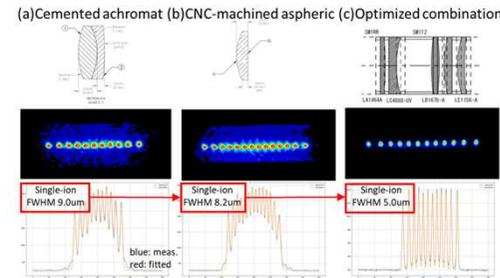
L2 メッキ後 (下地のAu除去済)



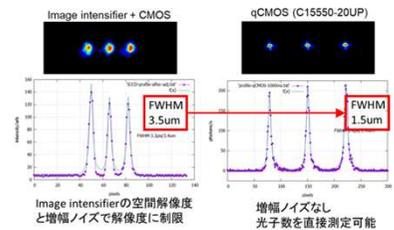
**AIN基板に両面電極加工を施した立体型トラップ試作に成功!**

## トラップ評価技術の研究開発

a. レンズ組合せによる回折限界光学系

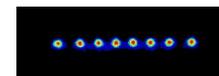


b. 非増幅型微弱光カメラ導入による空間分解能向上

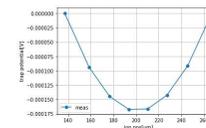


a. b.により  
蛍光光子数が4倍、  
空間分解能が6倍に  
向上

イオン列画像のみからトラップ電位、フォノンモード評価が可能に



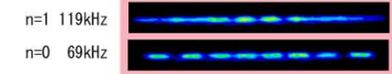
イオン列画像から  
推定したトラップ電位



イオン画像から予測される固有周波数と固有振動状態

n=7	381kHz	-	-	-	-	-	-	-	-
n=6	340kHz	-	-	-	-	-	-	-	-
n=5	299kHz	-	-	-	-	-	-	-	-
n=4	255kHz	-	-	-	-	-	-	-	-
n=3	211kHz	-	-	-	-	-	-	-	-
n=2	166kHz	-	-	-	-	-	-	-	-
n=1	119kHz	-	-	-	-	-	-	-	-
n=0	69kHz	-	-	-	-	-	-	-	-

実験で観測された固有振動状態と固有周波数 (推定精度>98%)



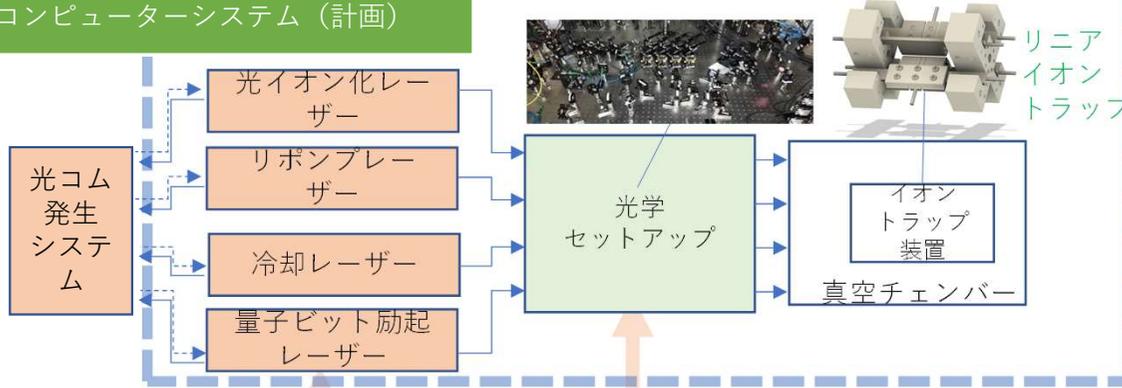
# 課題4-2:イオントラップ量子コンピュータのクラウド化基盤技術

## 課題概要

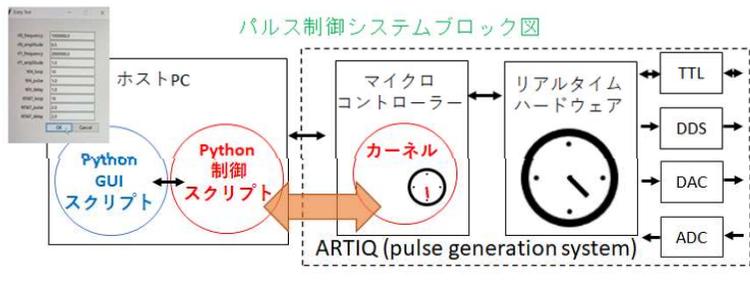
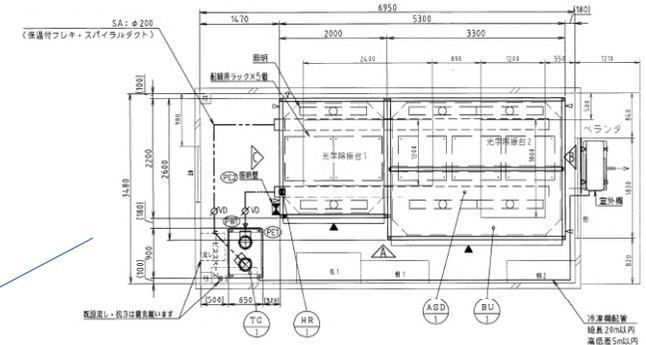
- クラウド型イオントラップ量子コンピュータのための技術開発
- フルリモート制御可能なイオントラップ

Yb+イオン超微細構造量子ビットを用いた量子コンピューターシステム (計画)

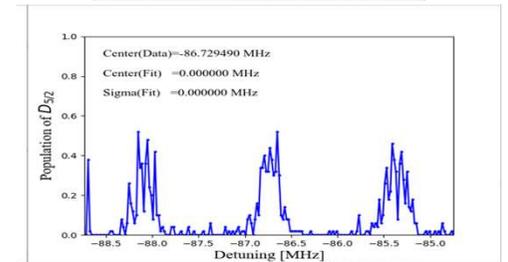
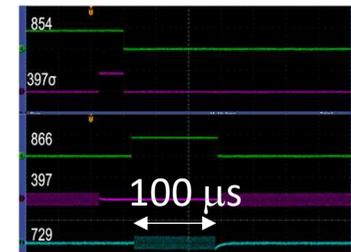
カルシウムイオン個別励起用光学系  
(これと同様のものを設置)



恒温ブース (温度安定度  $\pm 0.1$ 度)



パルス制御システム  
テスト結果  
(カルシウムイオンを使用)



# まとめ

- 従来のイオントラップにない革新的機能の実現と融合
  - 光共振器による量子光接続
  - 超伝導イオントラップによる超高精度量子論理
  - 振動量子状態による余剰ヒルベルト空間
- 下支えするトラップ作製・評価技術
- 社会実装のためのクラウド化技術
  - ➡ 光接続型イオントラップ量子コンピュータの実現！
- 2021年度は各課題で装置の調達・実験の立ち上げを行い、着実な進展があった

# 来年度計画

- 光接続
  - 微小光共振器一体型イオントラップでのイオンの安定なトラップ
  - Ba<sup>+</sup>イオン用の共振器一体型イオントラップの作製
- 超伝導トラップ
  - ヘリウム温度におけるイオントラップ
  - トラップ用RF共振器の高Q値化
  - 超伝導ナノワイヤー光検出器のイオントラップへの集積化方法検討
- 振動量子
  - 熱浴エンジニアリングにより振動状態におけるスクイーズド状態を実現
  - 振動モード間のビームスプリッター相互作用を誘起
- トラップ作製・評価技術
  - 立体型イオントラップの動作実証
- クラウド化技術
  - イオン自動ロードシステムのセットアップ
  - 量子ビット励起レーザーによる誘導ラマン遷移誘起の実現

# プロジェクト参加者

## • OIST

- 高橋優樹
- Ezra Kassa
- Joel Morley
- Soon Teh
- Dipto Das
- 山崎竜也
- 後藤溪
- 杉原忠
- 藤松佳晃

## • 東大

- 野口篤史
- 長田有登
- 中村一平
- 寺田規美代
- 渡辺玄哉
- 中島悠来
- 橋都みのり

## • 阪大

- 豊田 健二
- 大平龍太郎
- ムラリダランシルパ

## • NICT

- 早坂和弘
- 古澤健太郎
- 小林静一郎
- 和久井健太郎
- 達本吉朗
- 関根徳彦
- 諸橋功