

第30回 ICEPP シンポジウム

# 超伝導量子ビット直接励起を用いた暗黒物質探索の 準備研究

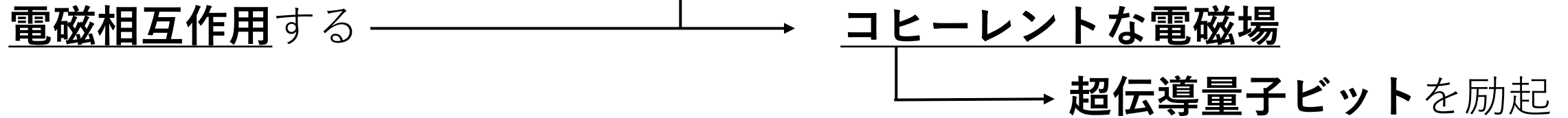
東京大学  
理学系研究科物理学専攻 修士1年  
渡邊香凜

# 探索対象: 電磁相互作用する波状暗黒物質

代表例: アクシオン, ダークフォトン

質量 $\mathcal{O}(\text{meV})$ の軽いダークマター

- 長いドブロイ波長:  $> \mathcal{O}(\text{m})$
  - 高い数密度:  $> \mathcal{O}(10^9 \text{ cm}^{-3})$
- コヒーレントな古典波に漸近



現在の我々のターゲットはダークフォトン

∵ ダークフォトン は光子への転換に磁場を必要としないので  
将来的にはアクシオン探索を見据える

ダークフォトン  
相互作用固有状態

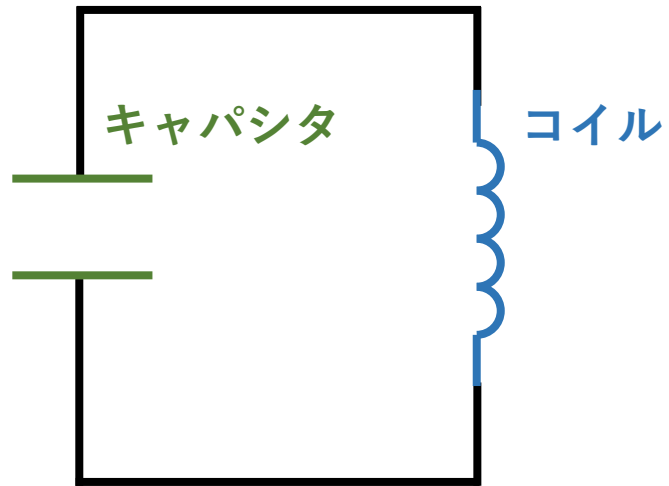
$$X^\mu = \tilde{X}^\mu - \epsilon A^\mu \text{光子}$$

ダークフォトン  
質量固有状態

kinetic mixing parameter

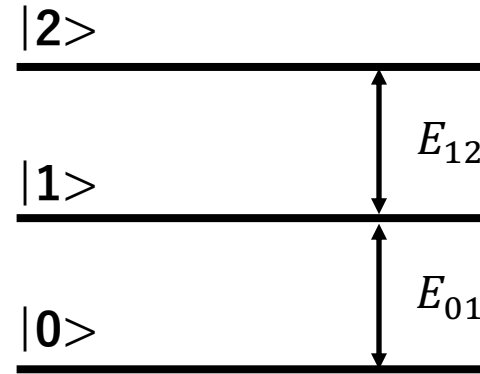
# 超伝導量子ビット: 非線形LC回路

## LC回路



コイル:

線形インダクタンス

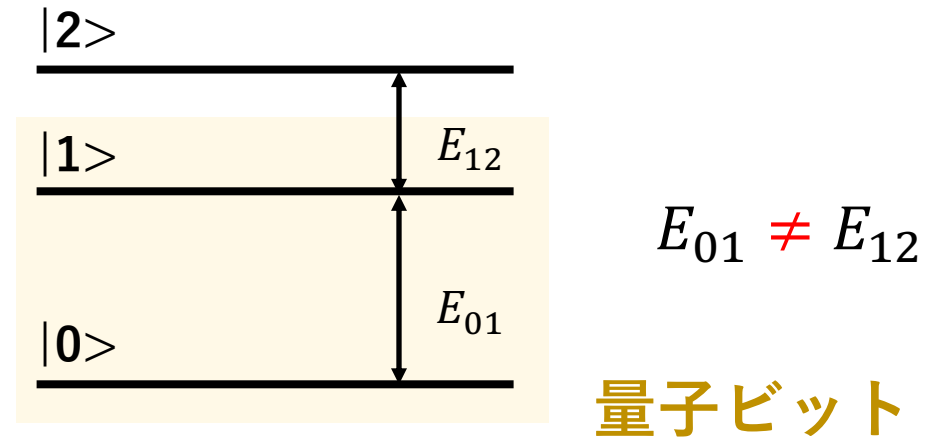
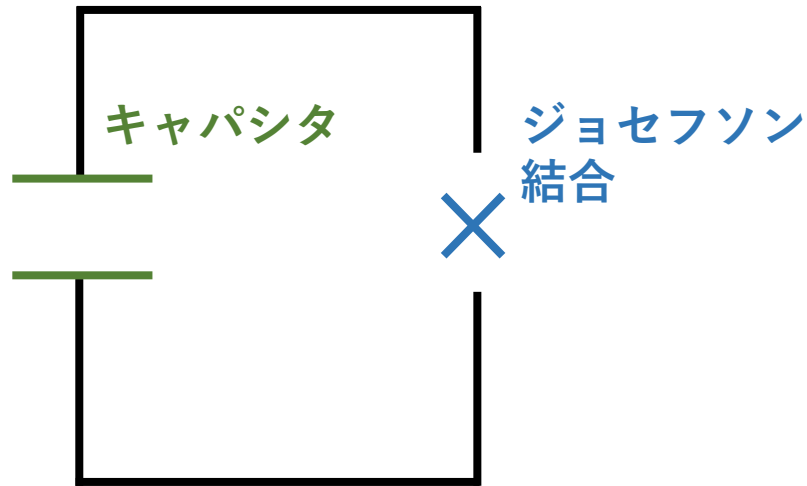


$$E_{01} = E_{12}$$

等間隔なエネルギー準位

# 超伝導量子ビット: 非線形LC回路

## 非線形LC回路

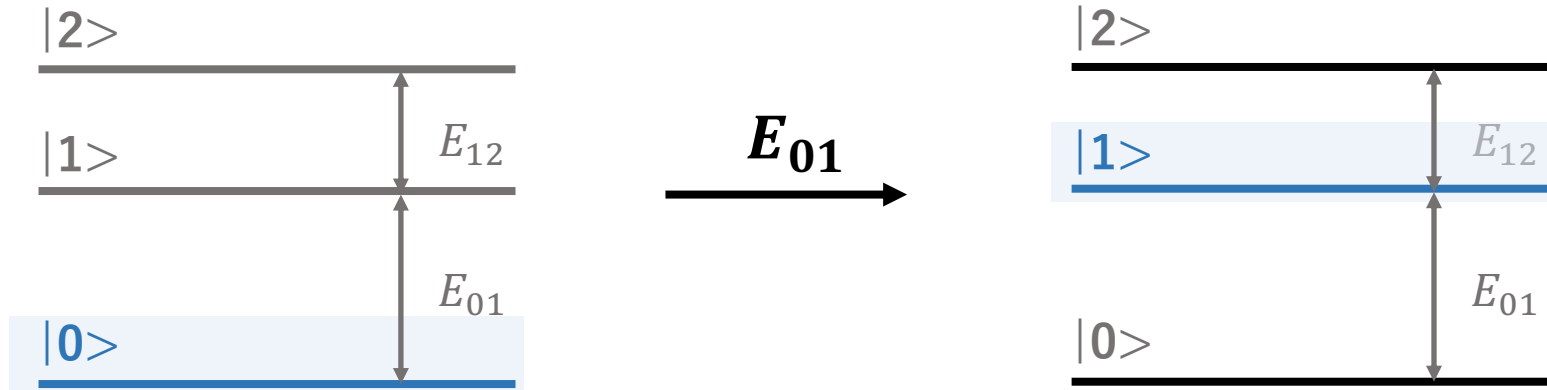


ジョセフソン結合:  
低温で**非線形**インダクタンス  
< 1.2 K

**非等間隔**なエネルギー準位  
実用上必須

# 超伝導量子ビット：非線形LC回路

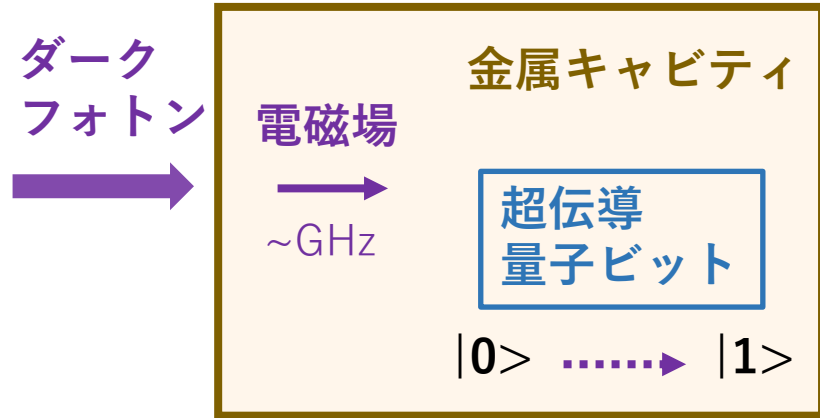
## 非線形LC回路



エネルギーが等間隔だと  
どんどん上の状態への励起が進み  
状態の制御・読み出しが  
現実的に難しい

- $|0\rangle$ 状態の量子ビットにエネルギー  $E_{01}$  を与えると  $|1\rangle$  に励起
- エネルギー準位が非等間隔なので、 $|1\rangle$  より上の準位には励起しない

# 探索原理: 量子ビット励起でダークフォトン電磁場の周波数を調べる



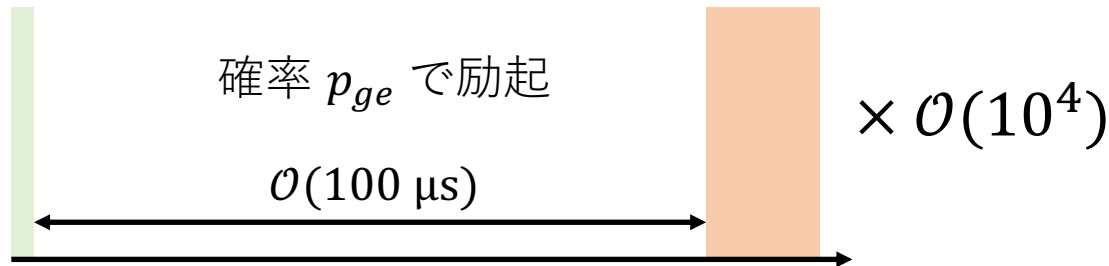
- ダークフォトンが質量に対応する周波数の電磁場に変換
- 電磁場周波数 = 量子ビット励起周波数 → 励起

$$f_{01} = \frac{E_{01}}{h}$$

実際にやること

量子ビット初期化  
~ 20ns

読み出し  
~ 1μs



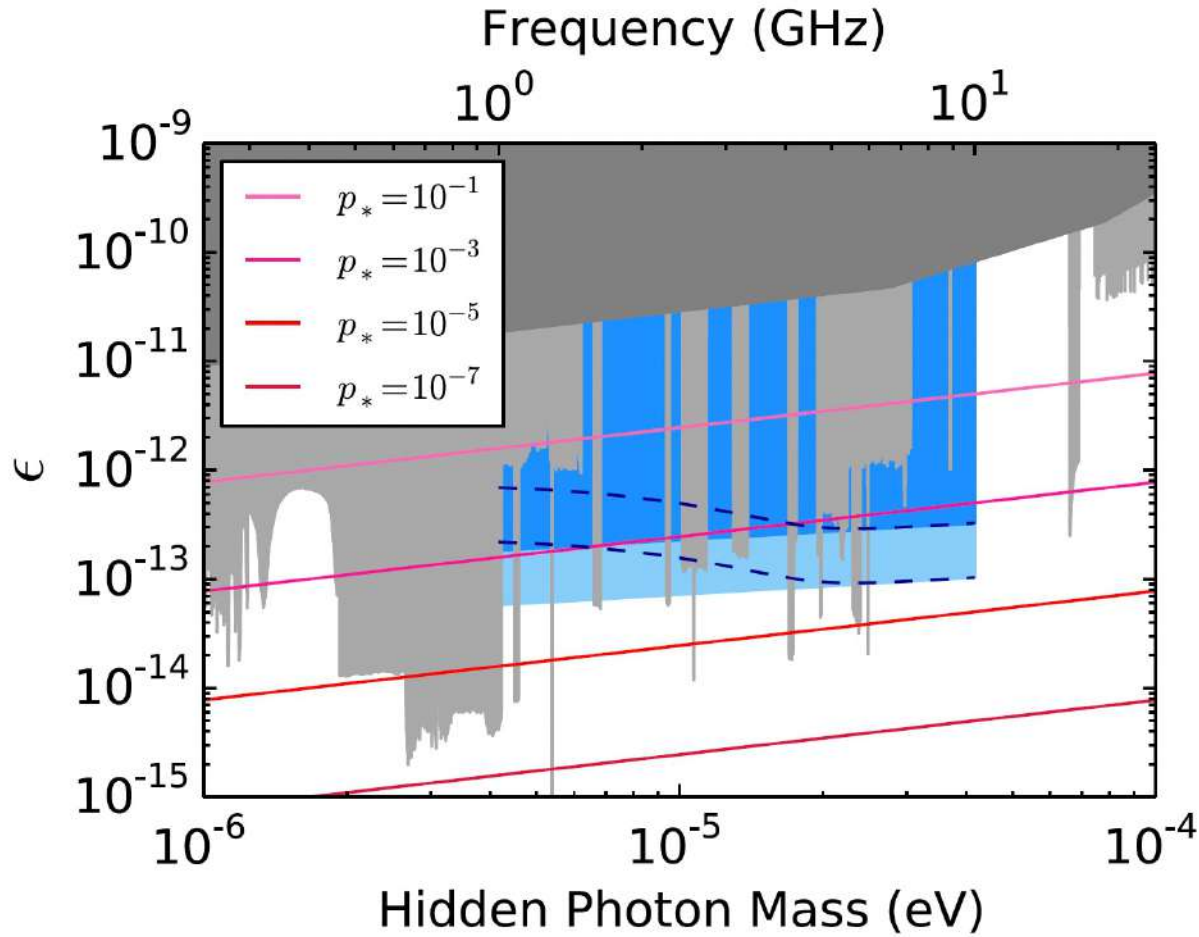
kinetic mixing parameter    励起周波数    量子ビット寿命

$$p_{ge} \cong 0.12 \times \kappa^2 \cos^2 \Theta \left( \frac{\epsilon}{10^{-11}} \right)^2 \left( \frac{f_{01}}{1 \text{ GHz}} \right) \left( \frac{\tau}{100 \mu\text{s}} \right)^2$$

計算or  
シミュレーションで  
出る既知量

$$\left( \frac{C}{0.1 \text{ pF}} \right) \left( \frac{d}{100 \mu\text{m}} \right)^2 \left( \frac{\rho_{DM}}{0.45 \text{ GeV/cm}^3} \right)$$

# 期待探索域:



青色: 量子ビット1個で1年測定 @ 1mK  
水色: 量子ビット100個で1年測定 @ 1mK  
点線: 30mK  
濃灰・灰: 棄却領域

未棄却領域で  
0.1%–10%の励起確率  
探索可能

Chen, Fukuda, Inada, Moroi, Nitta, Thanaporn  
<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.131.211001>

# ダークカウントの原因: 熱励起と読み出しエラー

暗黒物質探索では量子ビットの励起確率 i.e. 励起回数を測定  
この励起回数測定で間違えて数えてしまうもの = ダークカウント

主なダークカウントは2つ:

**熱励起:** ~**0.1%** @< 30mK

暗黒物質由来の電磁場ではなく、  
熱で量子ビットが励起したことで  
生じるエラー。

Jin et al. (2014)  
[https://link.aps.org/doi/10.1103/  
PhysRevLett.114.240501](https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.114.240501)

**読み出しエラー:**

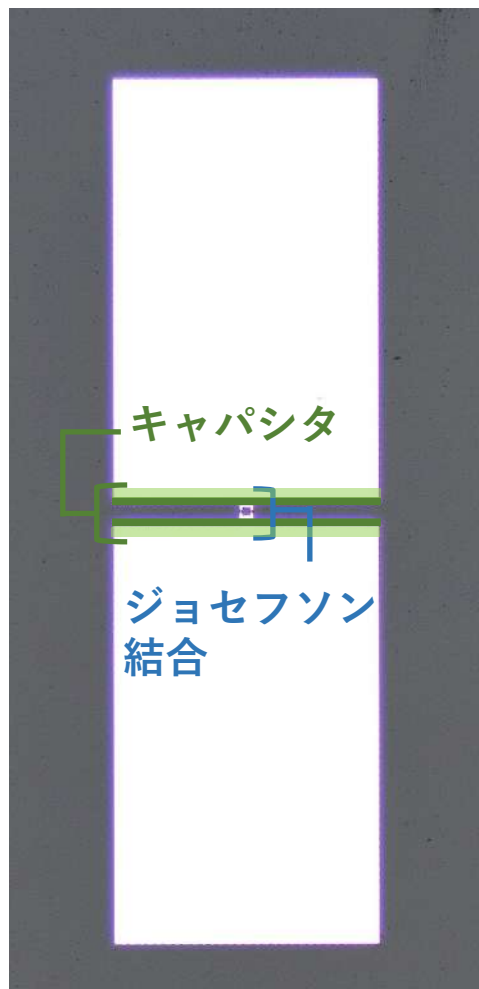
$|1\rangle$ を $|0\rangle$ と読んでしまうエラー。  
現在最も良い方法では**0.1%**

→**改善に注力**

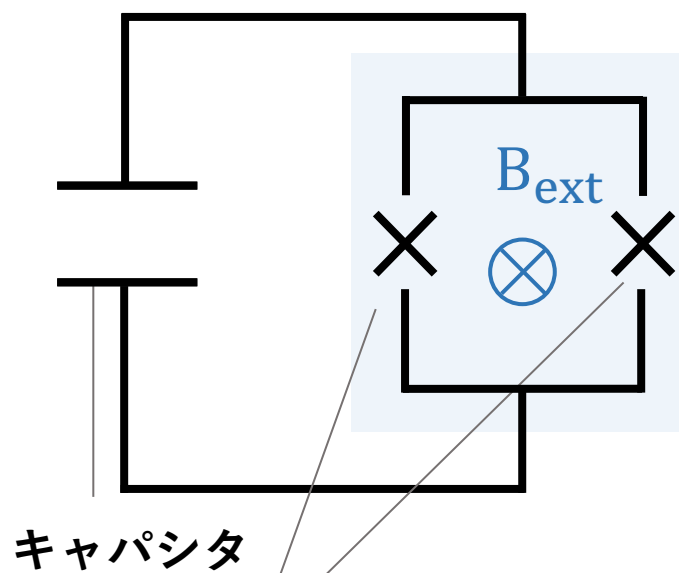
L. Chen et al.  
[https://www.nature.com/articles/  
s41534-023-00689-6](https://www.nature.com/articles/s41534-023-00689-6)



# 励起周波数の変更: SQUID型トランズモンに磁場をかける



作成したSQUID型トランズモンの  
10倍顕微鏡写真



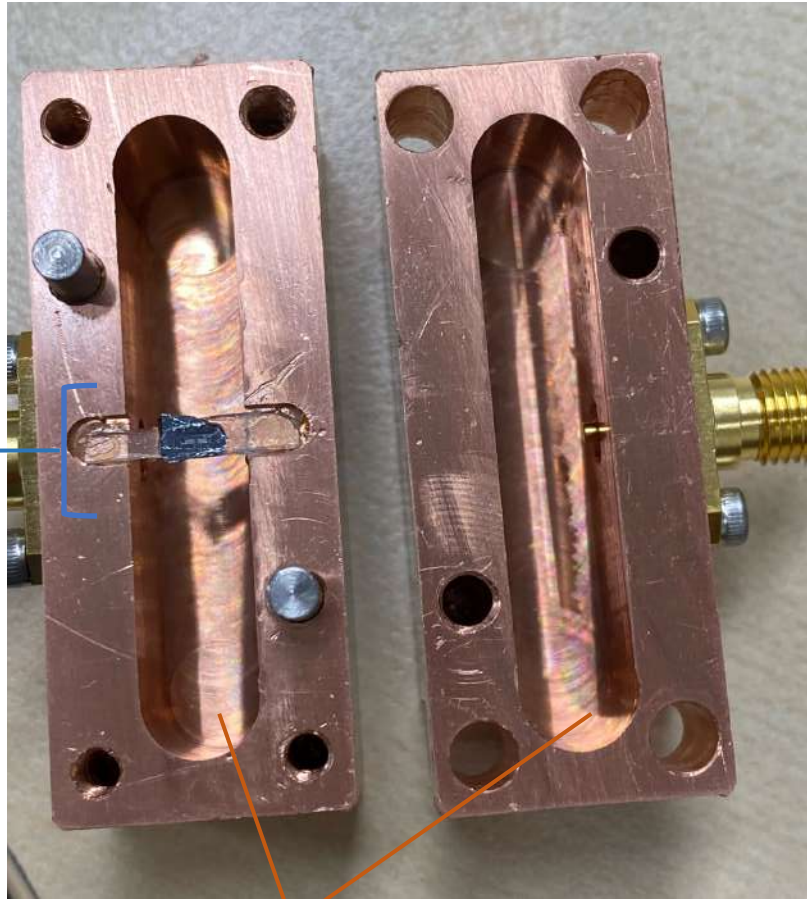
**ジョセフソン結合**  
低温で非線形インダクタンス  
< 1.2 K

Al
AlOx
Al

## SQUID型トランズモン:

- キャパシタと並列ジョセフソン結合の並列回路
- 超伝導量子ビットの1つ
- SQUIDを貫く外部磁場 $B_{ext}$ の操作でエネルギー準位を調整できる  
→励起周波数を調整できる

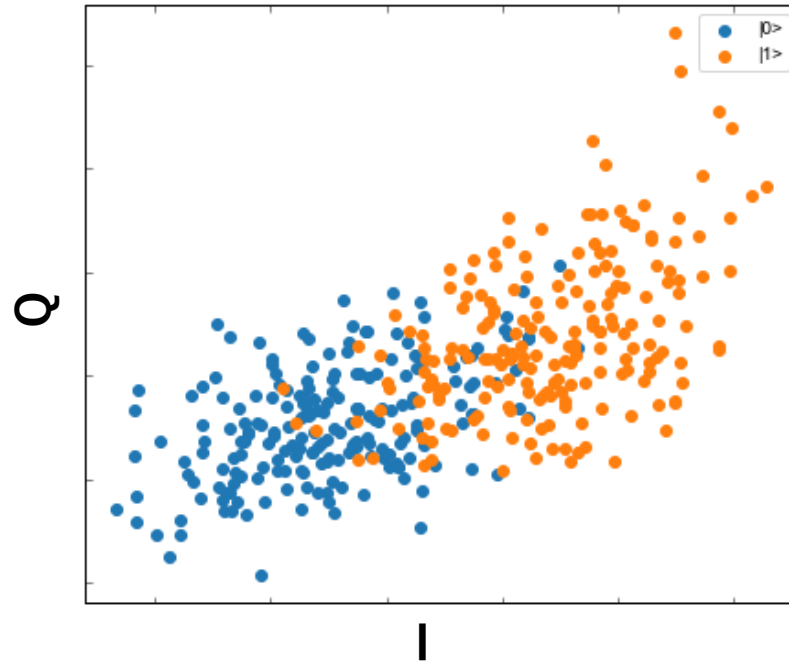
# 読み出し: 読み出しパルスを入れて透過波位相のずれを測定



量子ビット

銅キャビティ

共振周波数が量子ビットの状態によって変わる  
→透過波の位相のずれ $\phi$ が変わる  
→読み出しパルスを入射し  
透過波位相を測定



$$A \sin(2\pi f_{\text{read}} t)$$

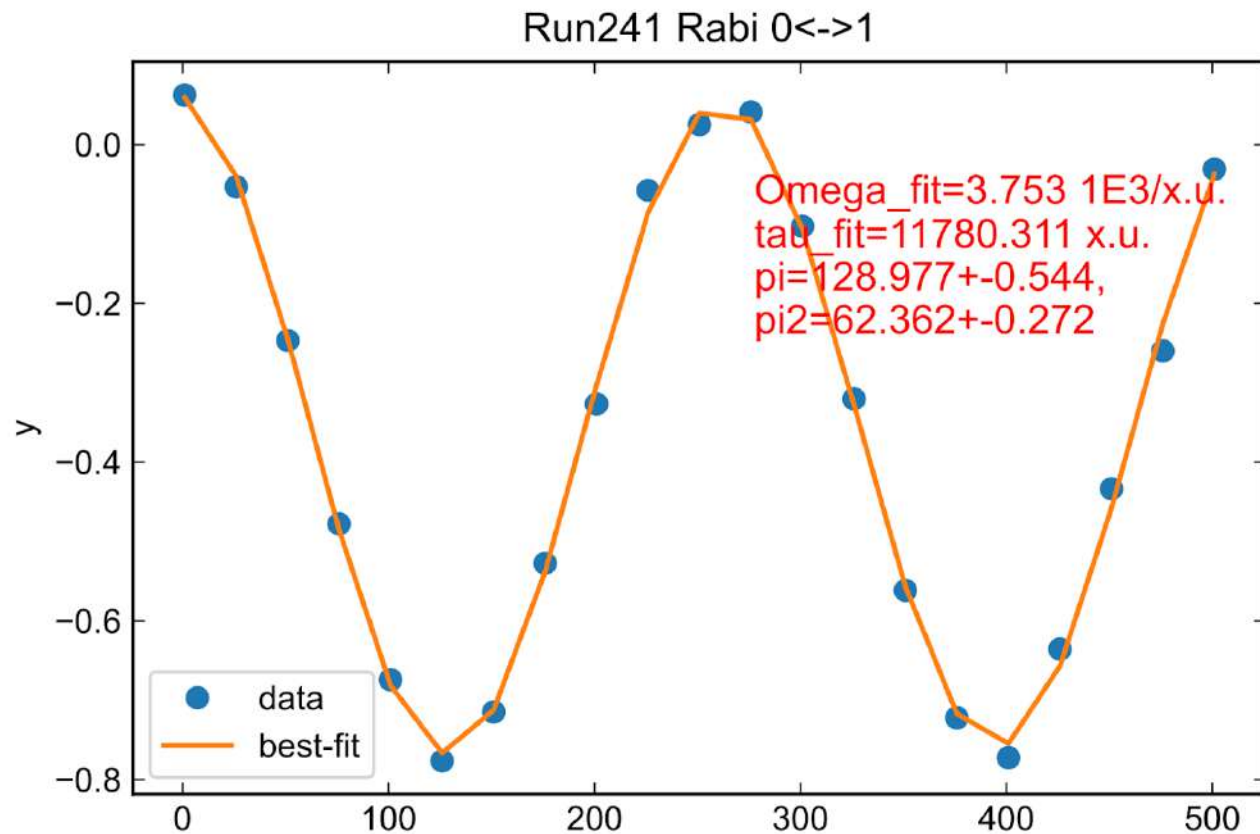
→量子ビット+キャビティ

$$\rightarrow A \sin(2\pi f_{\text{read}} t + \phi)$$

$$= I \sin(2\pi f_{\text{read}} t) + Q \cos(2\pi f_{\text{read}} t)$$

# 制御: ドライブパルスを照射

周波数  $f_{01} = \frac{E_{01}}{h}$  の電磁場

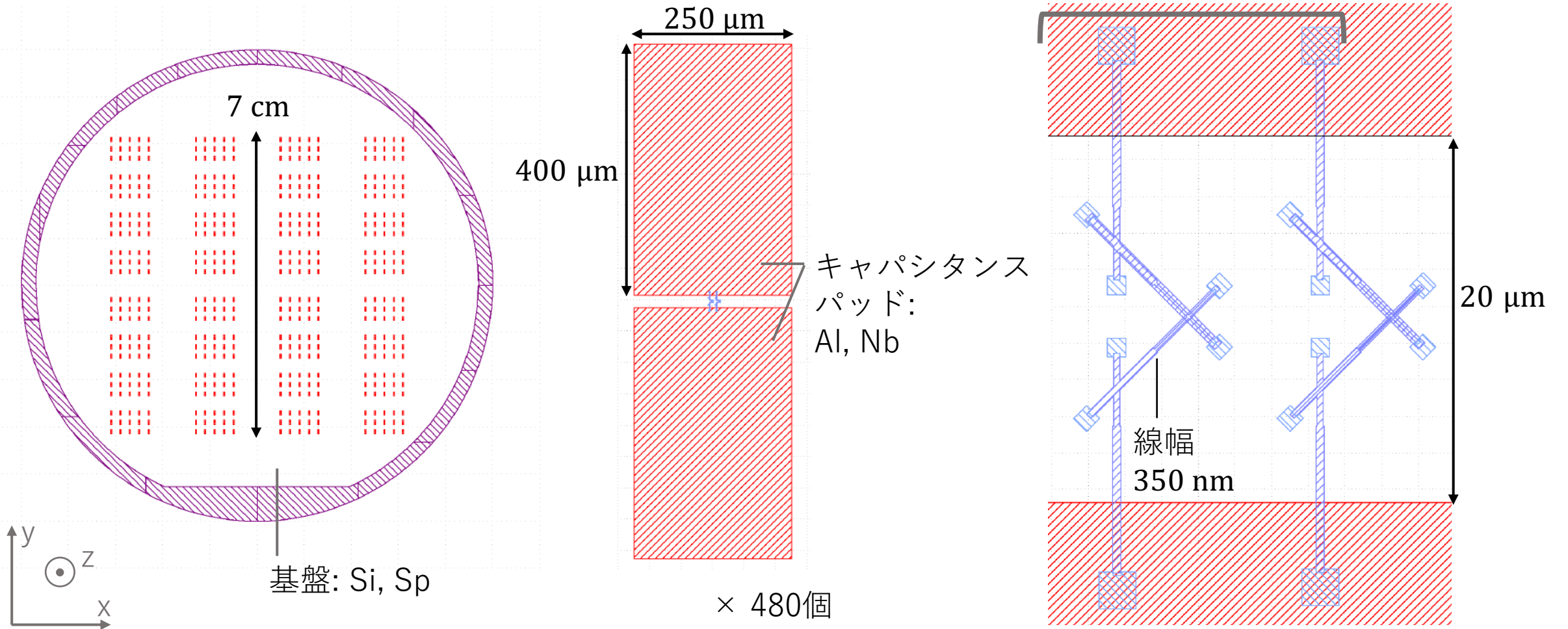


ドライブパルス照射時間 ns

Rabi振動の様子

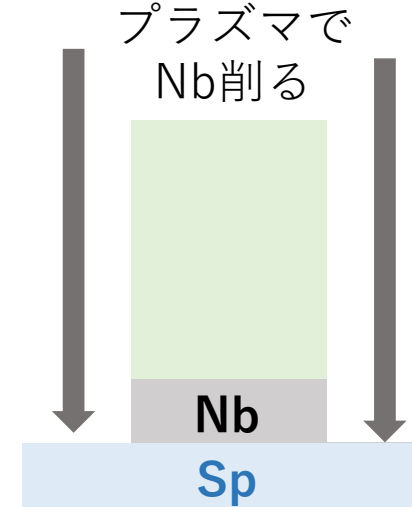
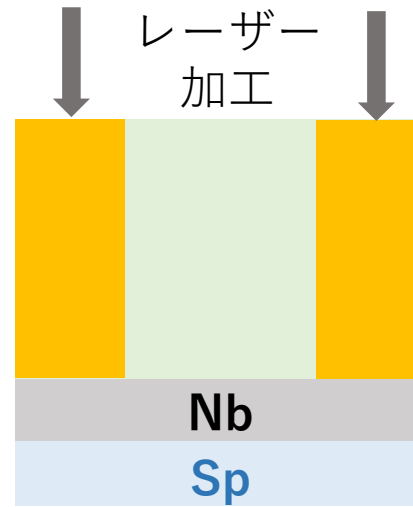
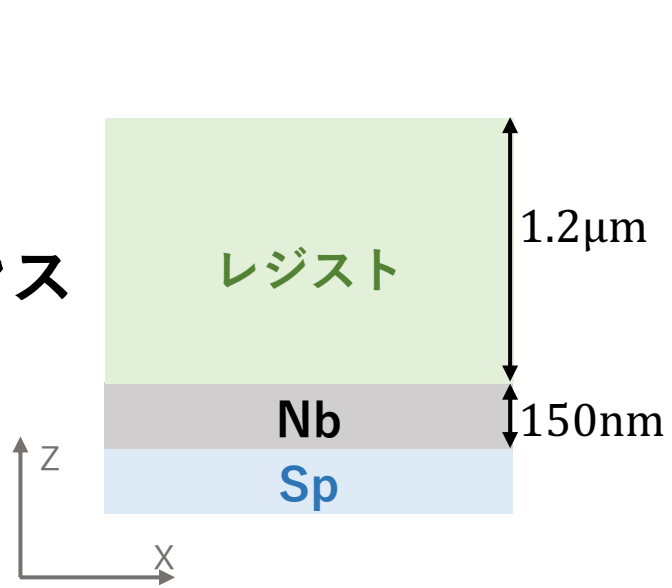
ドライブパルス照射時間に応じ  
 $|0\rangle \leftrightarrow |1\rangle$ 間を振動 (Rabi振動)

# 量子ビットのデザイン:

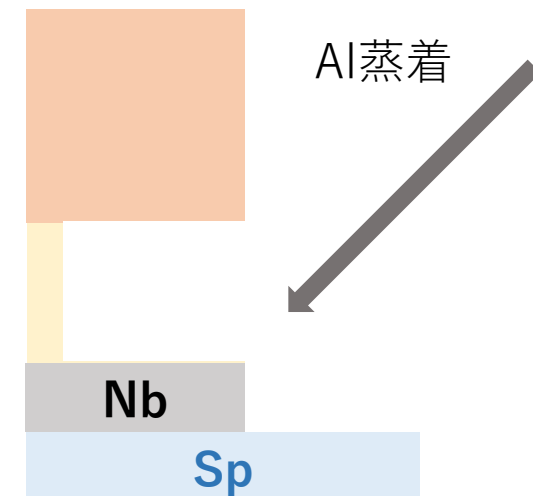
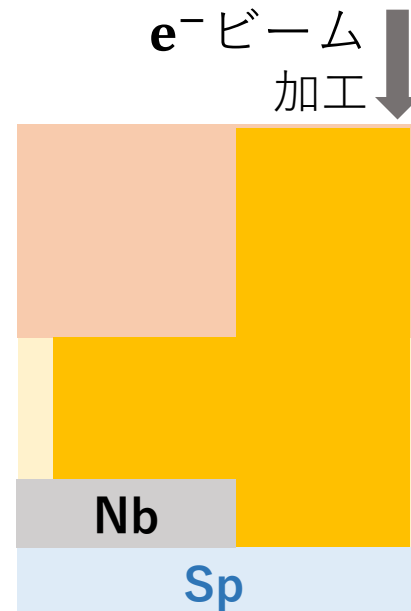
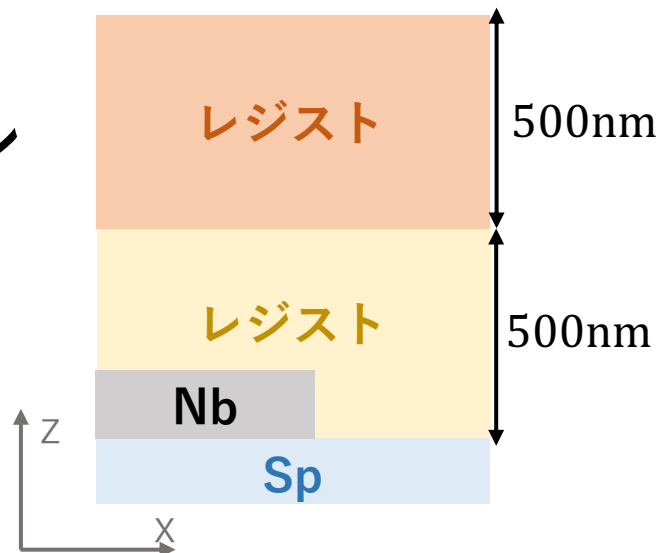


# 量子ビットの作り方: レジスト加工→金属 削る or 蒸着

キャパシタンス  
パッド



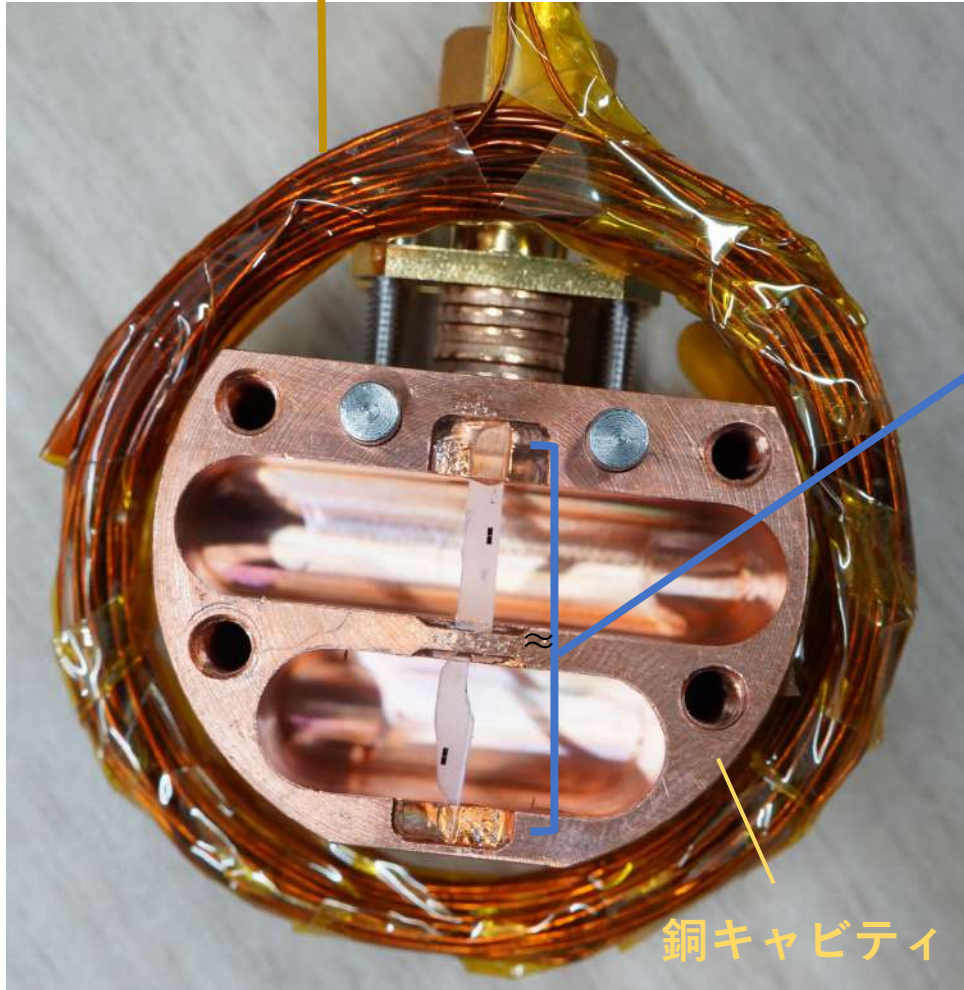
ジョセフソン  
結合



# 測定セットアップ:

NbTi線 40周のコイル

電流を流し  
1-10mTの磁場を生成

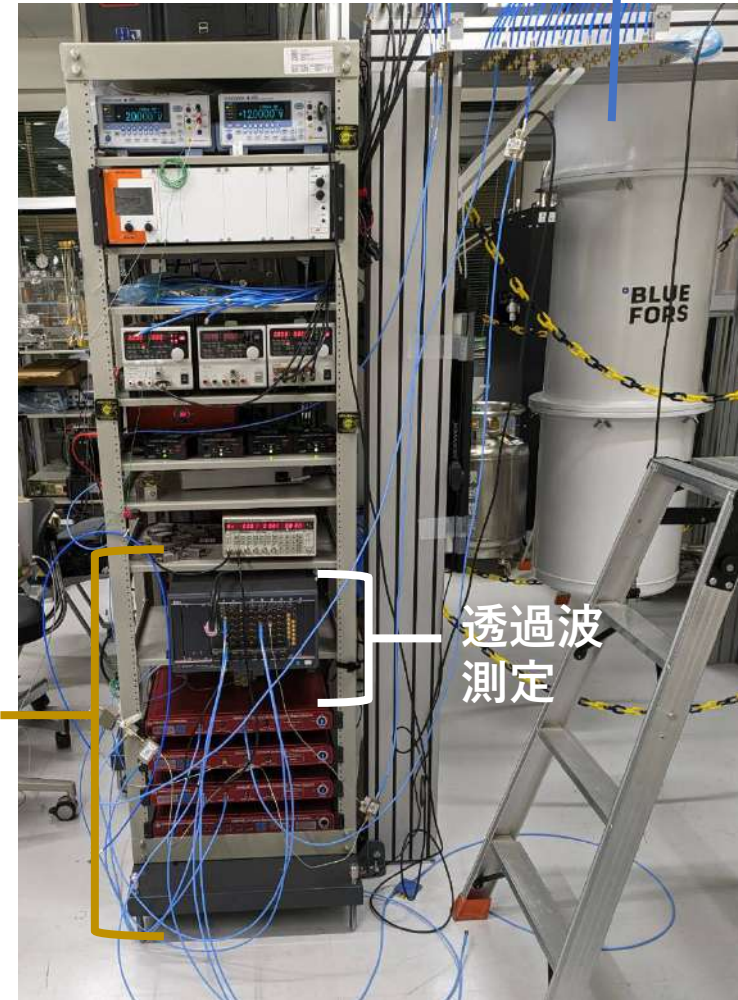


量子ビット  
寿命  $\sim 10 \mu\text{s}$

銅キャビティ

作成した量子ビットとキャビティ

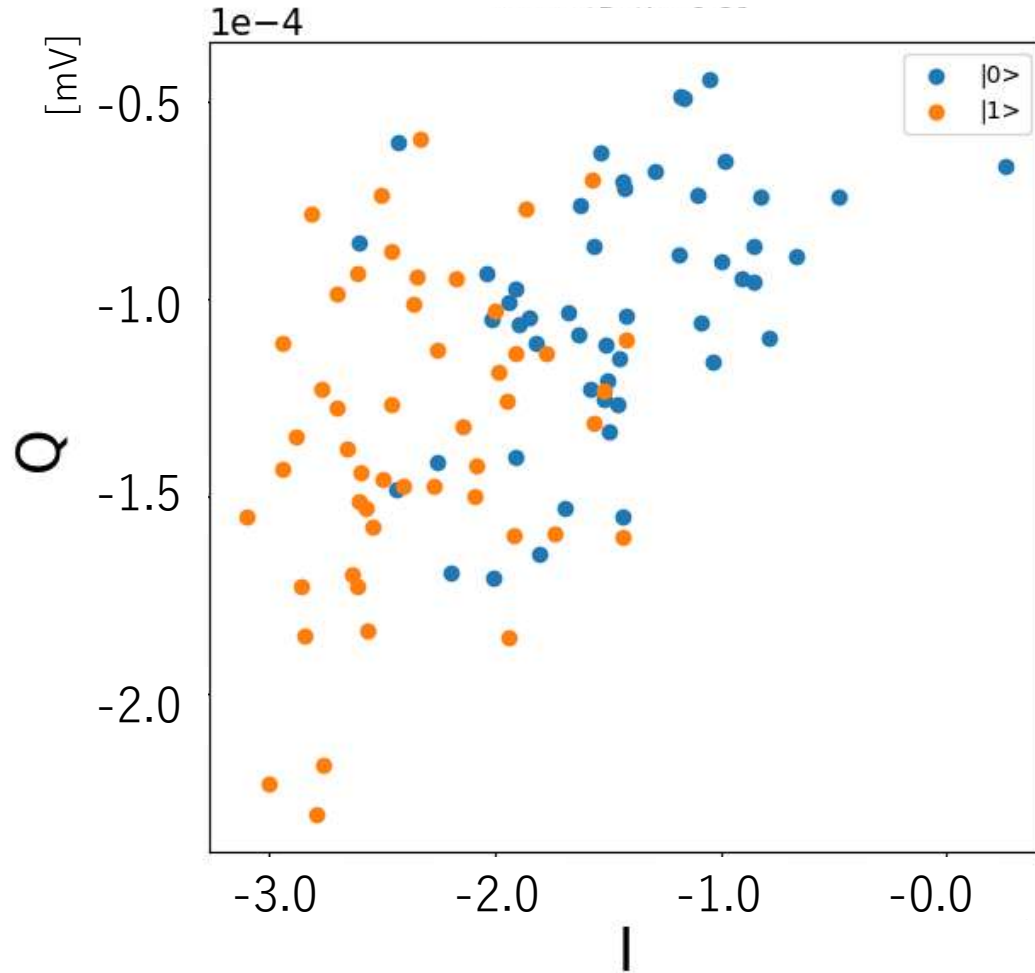
希釈冷凍機  $\sim 10 \text{ mK}$



読み出し  
パルス・  
ドライブ  
パルスの  
生成

透過波  
測定

## 現状の読み出し状況:



- $|0\rangle$ ,  $|1\rangle$ の透過波100点ずつについて、IQ平面上で重心座標を出しておく
- 事前に求めた重心どちらに近いかで  $|0\rangle$  or  $|1\rangle$ を判定
- 100回読み出して80%程度の精度

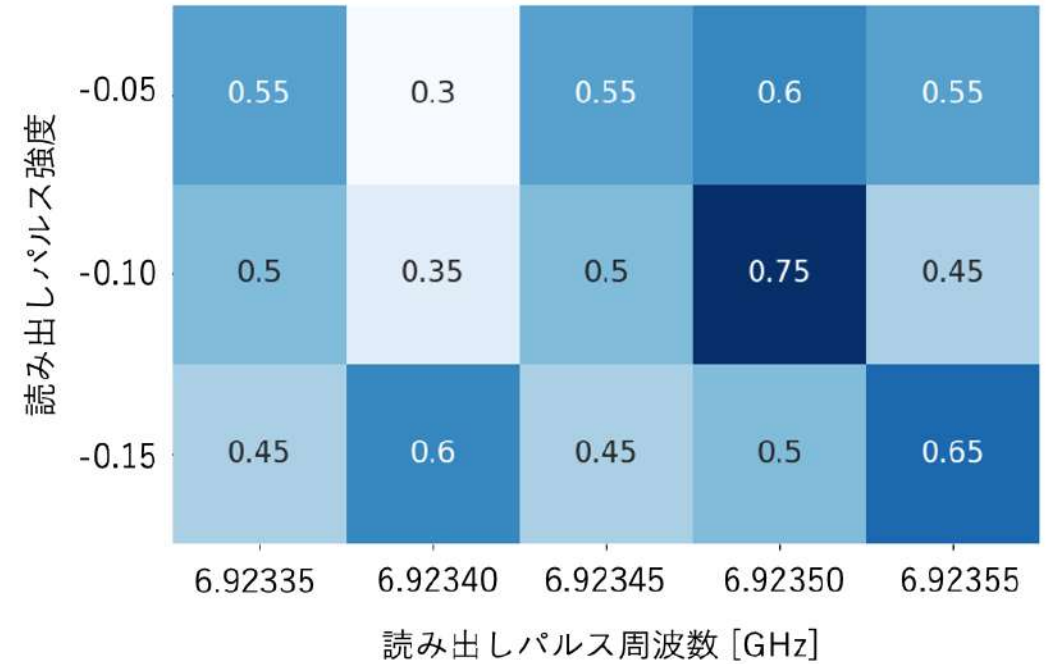
# 実際の測定に向けて:

## 読み出しエラーの改善

- 読み出しパルスの最適化はすでにやった
- 今影響が大きいのは読み出しパルスのノイズ  
→RF系の改善  
    アンプをより低温で入れる, ノイズフィルターの追加

## 量子ビットの安定量産

- レシピとデザインは最適化中
- 色々試して良いものを見つける





# まとめ

- **ダークフォトン**は**質量に対応した周波数の電磁場に転換**する
  - **超伝導量子ビット**は自身の励起周波数と同じ周波数の**電磁場を検知**できる
  - SQUID型トランズモンというタイプの超伝導量子ビットを使えば、外部磁場によって簡単に励起周波数を調節できる i.e. 検知する電磁場の周波数を調整できる
- **超伝導量子ビットでダークフォトンの質量を調べられる**
- 今後は読み出し精度の改善と量子ビットの安定量産に努める