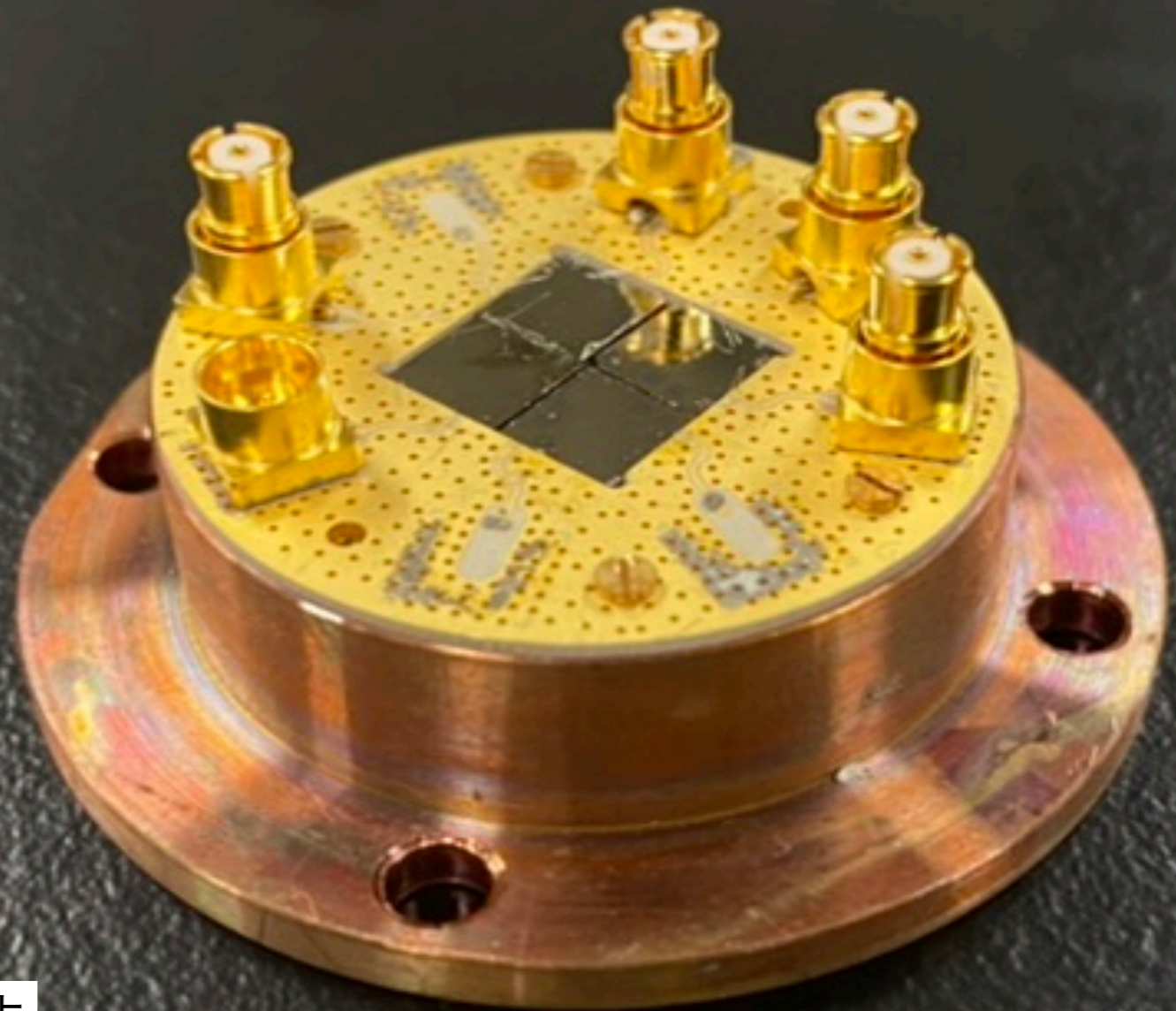


Introduction : 量子 (#quantum)

2026.4.17 高エネ 新M1ガイダンス

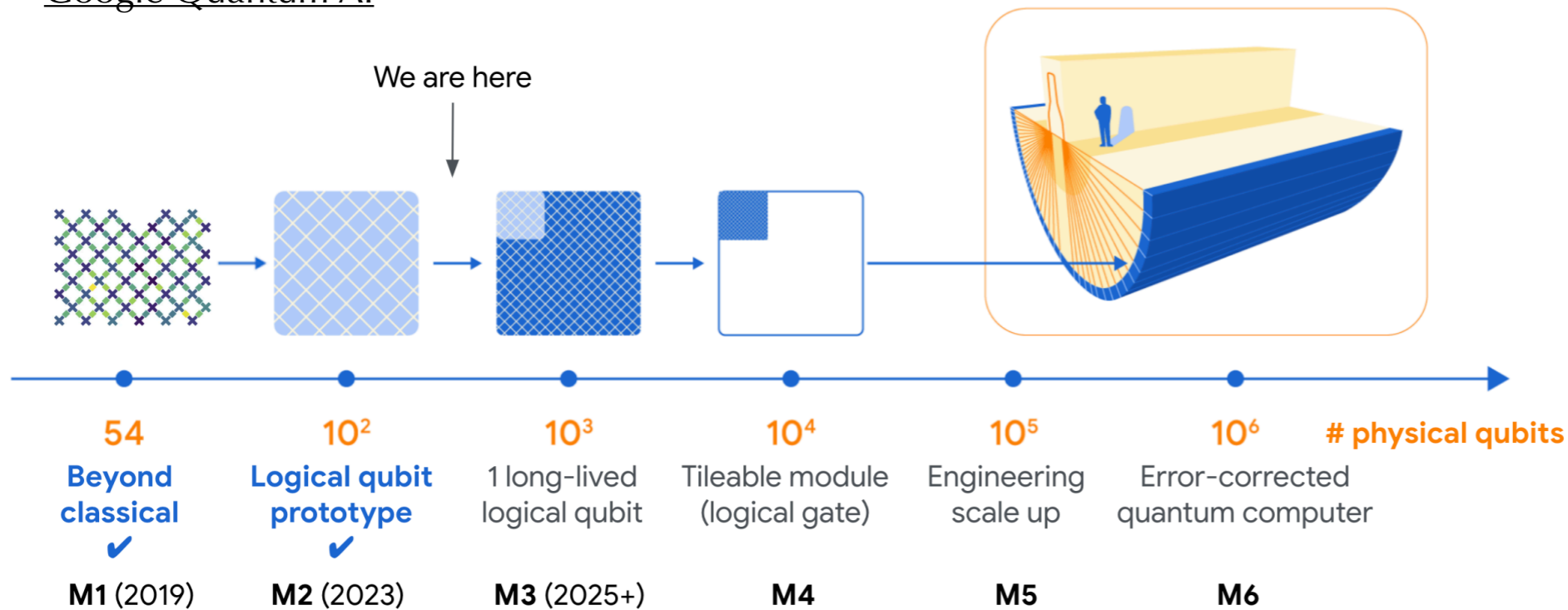
Web page: <https://sites.google.com/view/kyoto-hep-quantum/home>



高エネルギーニューズの記事も是非

量子コンピューター、できそうである

Google Quantum AI



IBMのオリジナル巨大希釈冷凍機



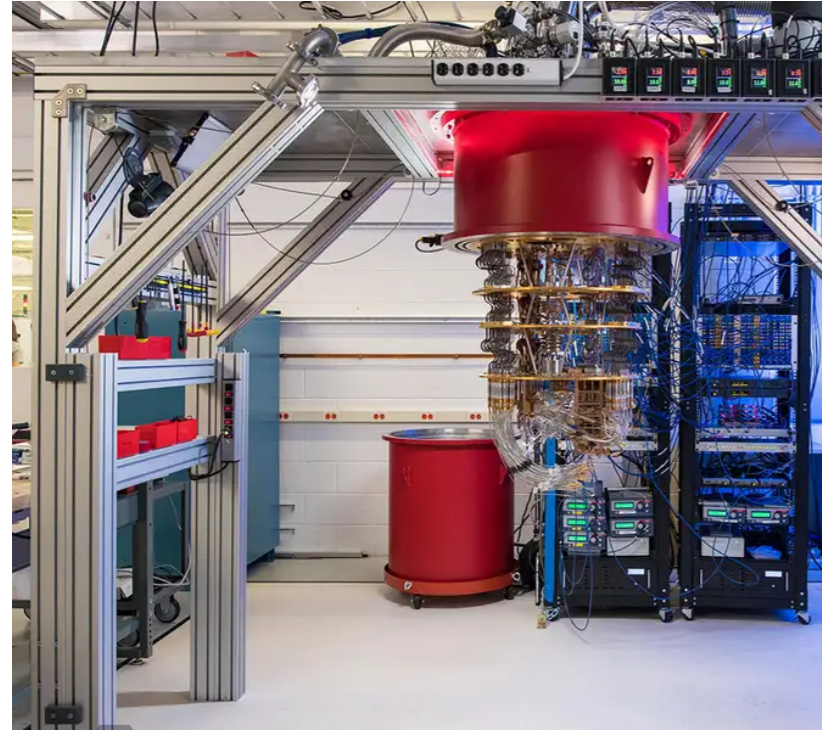
IBM Quantum roadmap

- ✓ 使える量子ビットの確立
 - ✓ 大規模集積化とエラー訂正の近年のブレイクスルー
- まだ課題は多いが急速に夢物語ではなくなりつつある

It's official: Google has achieved quantum supremacy

By Daniel Cossins

📅 23 October 2019



▲ Google's quantum computer is a record-breaker
HANNAH BENET/Google

量子コンピューターが15~30年以内に最大8,500億ドルの価値を創出すると予測~BCG調査

金の泉

Honeywell's quantum computing firm valued at \$5 billion after latest fundraise

By Reuters

January 17, 2024 2:33 AM GMT+9 · Updated 3 months ago



2023年10月5日
理化学研究所

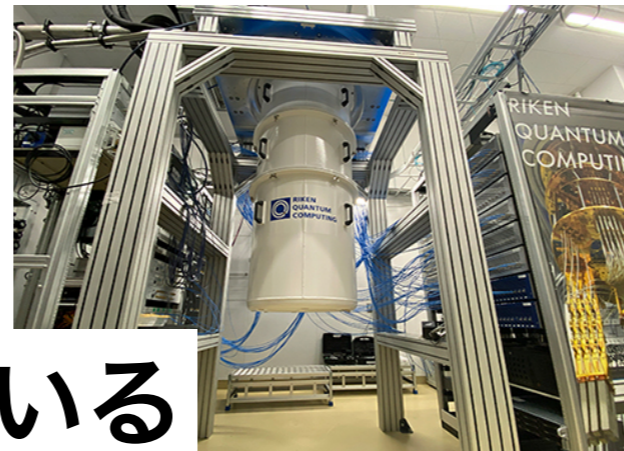
[前の記事](#) [一覧へ戻る](#) [次の記事](#)

国産量子コンピュータ初号機の実称「叡（えい）」に決定

—量子コンピュータ実機開発の第一歩であることを表現—

理化学研究所（理研）量子コンピュータ研究センター（RQC）は、2023年8月27日にクラウド利用を開始した国産超伝導量子コンピュータ初号機の実称を「叡（えい、英語表記は"A"）」に決定しました。

「叡」は聡明さを表し、量子コンピュータの情報処理における卓越性・先進性を表すとともに、英語名をアルファベット順の最初の文字である"A"とすることで、当該機がRQCにとっての、また国産量子コンピュータ初号機として日本にとっての、量子コンピュータ実機開発の第一歩であることを表現しています。



IBMやGoogleなど、日米の大学に290億円 量子・半導体

G7広島サミット [+フォローする](#)

2023年5月21日 16:55

保存



巡る日米協力でマイクロンのCEO（右から3番目）、東京エレクトロン・河合利樹社長（同4番目）らが調印式（日、広島市）



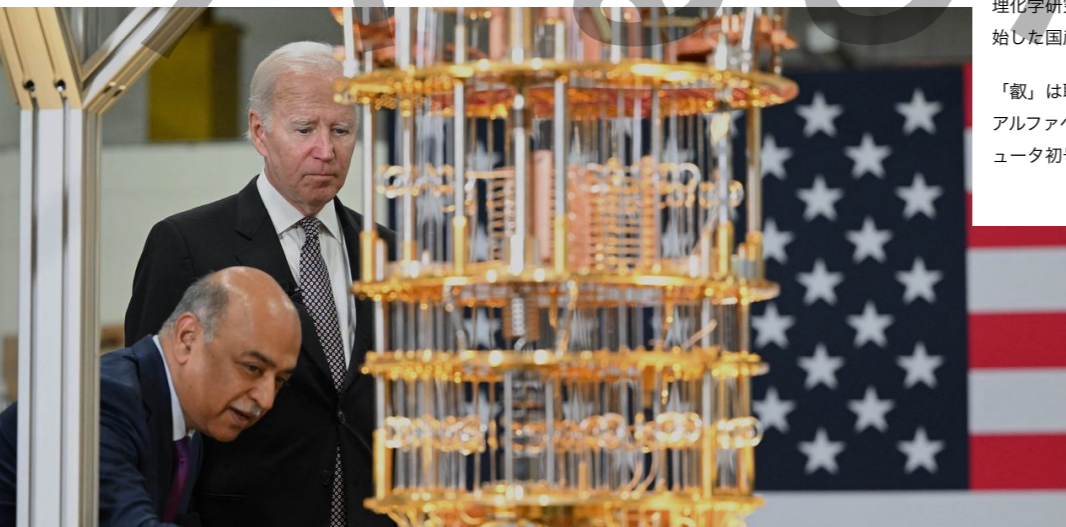
QuEL, Inc.

収入がn倍になりました

量子コンピュータの実用化を加速させることで、人類の解決に貢献する

キューエル株式会社は、量子コンピュータの制御装置・ミドルウェアの専門メーカーとして、高性能制御装置・ミドルウェアを提供することで量子コンピュータ技術の進化を加速させ、人類の課題解決に貢献します。

量子コンピュータ制御装置「QuEL-1」



ビッグウェーブ💰が来ている

量子ビットとは

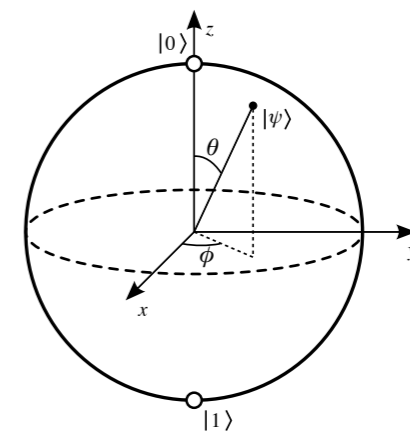
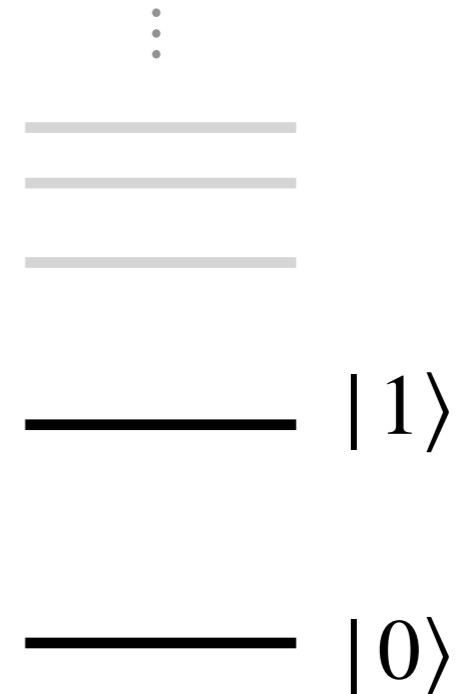
- 量子的な2準位系
- エネルギー差が制御可能
- ノイズに著しく弱い

逆にいうとセンサーとしては有能

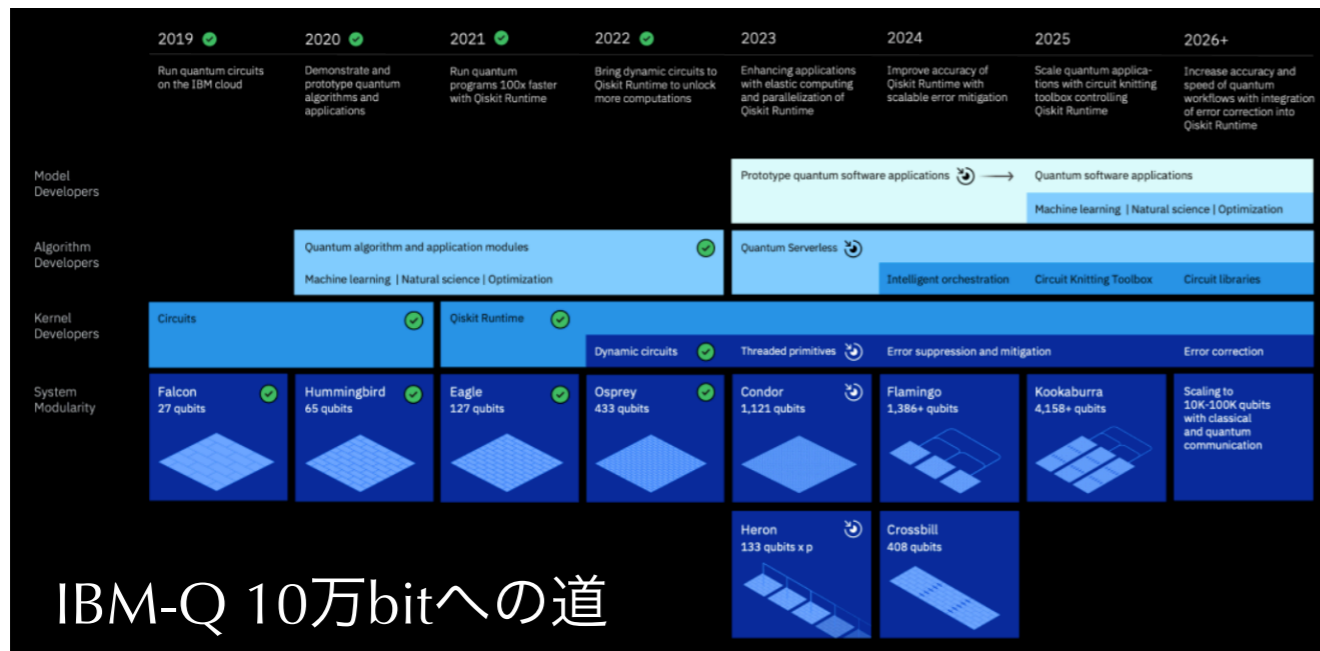
- この20年で凡庸へのノイズ耐性が格段に向上

変なノイズ (信号) だけ見える状況に

- 流行りに便乗するメリット：
これから勝手によくなってく



当初の使命: IBMと量子コンピューター関連のデバイス作る



ICEPP 量子ハードウェアチーム (初年度 2022)

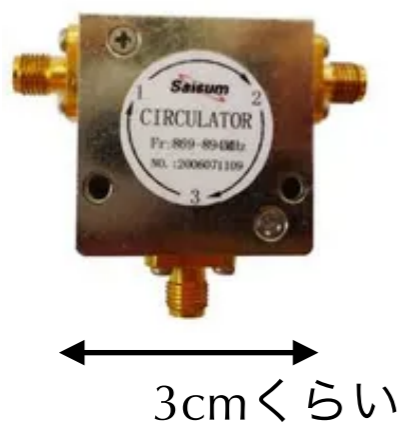


稲田さん

新田さん

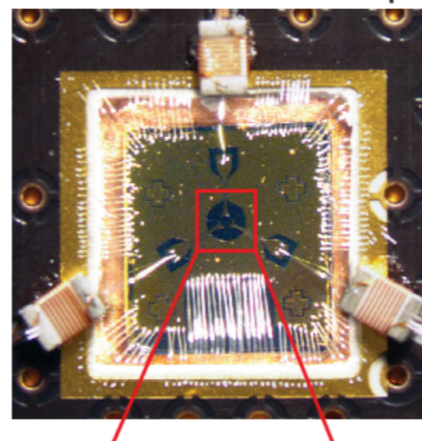
私

e.g. 普通のサーキュレータ

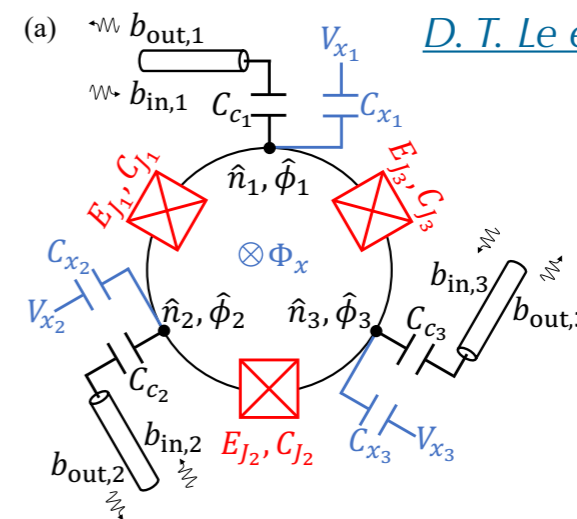


ジョセフソン接合 (~量子ビット) で作ったサーキュレーター

Mahoney et al. (2017)



D. T. Le et al. (2021)

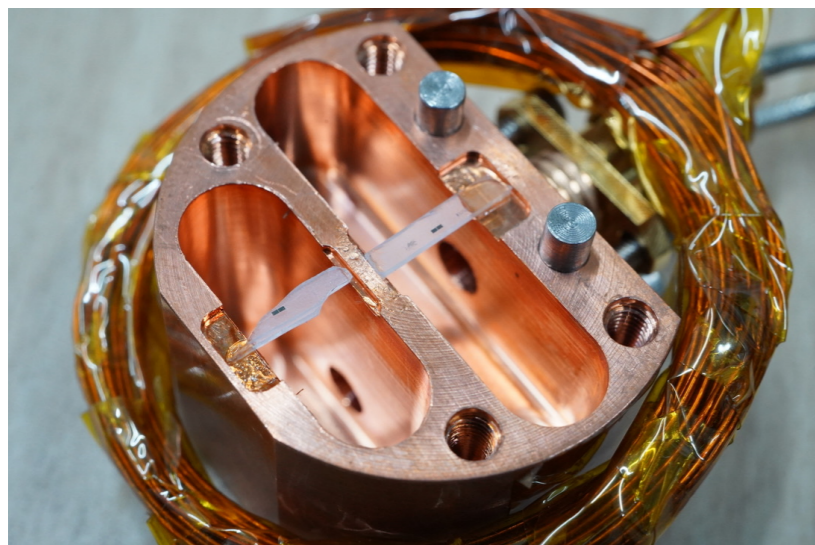


ほどなくして量子ビットがダークマター探しに使えることに気づく

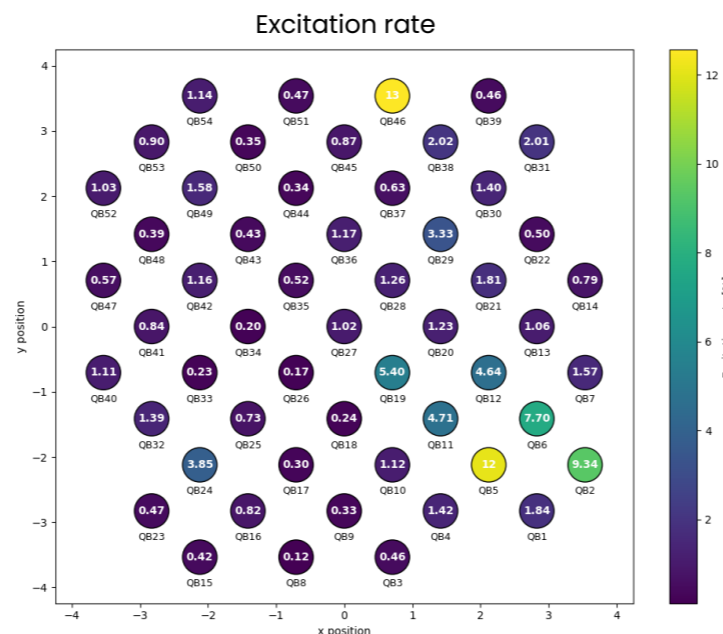
HE量子 今のネタたち

超伝導量子ビットを軸に色々やってる

量子ビットでDM探索

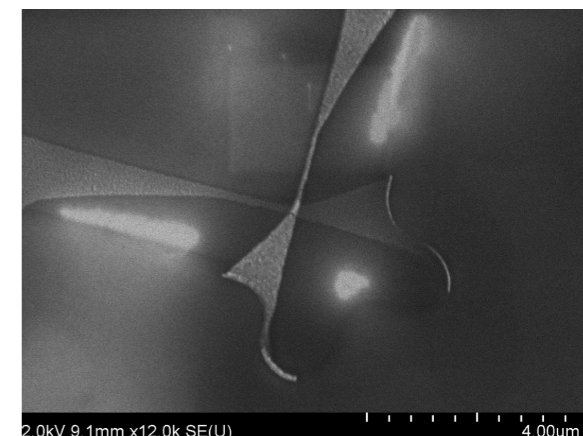
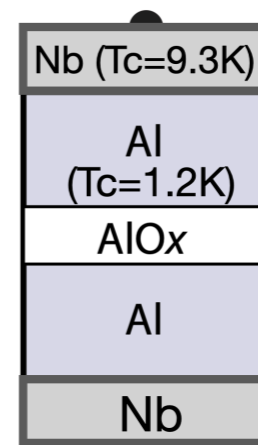


量子コンピュータでDM探索

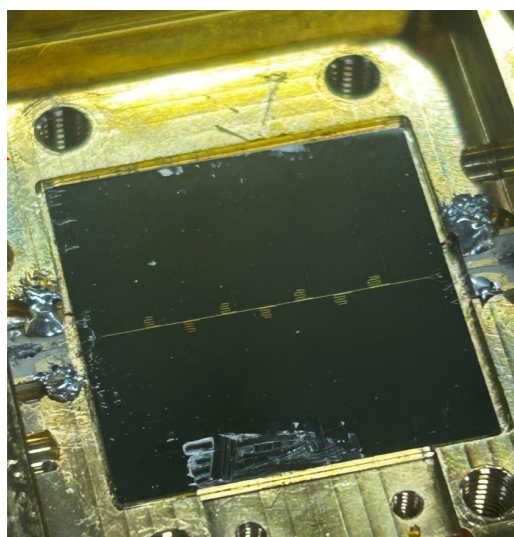


新規量子ビットセンサーの開発

高周波化・強結合化・強磁場耐性化

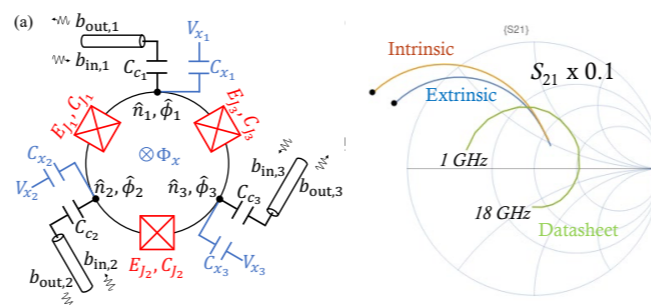
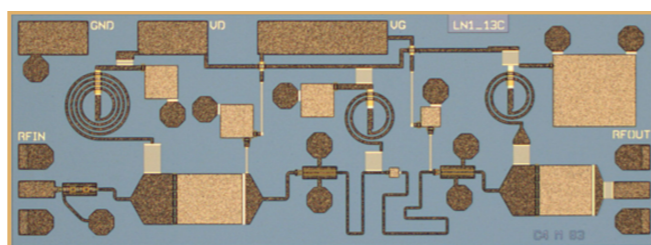


2次元共振器を使った 高周波重力波探索

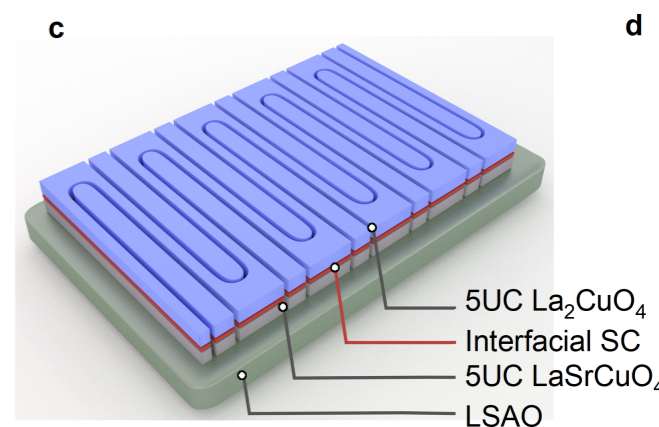


中村くんのスライド

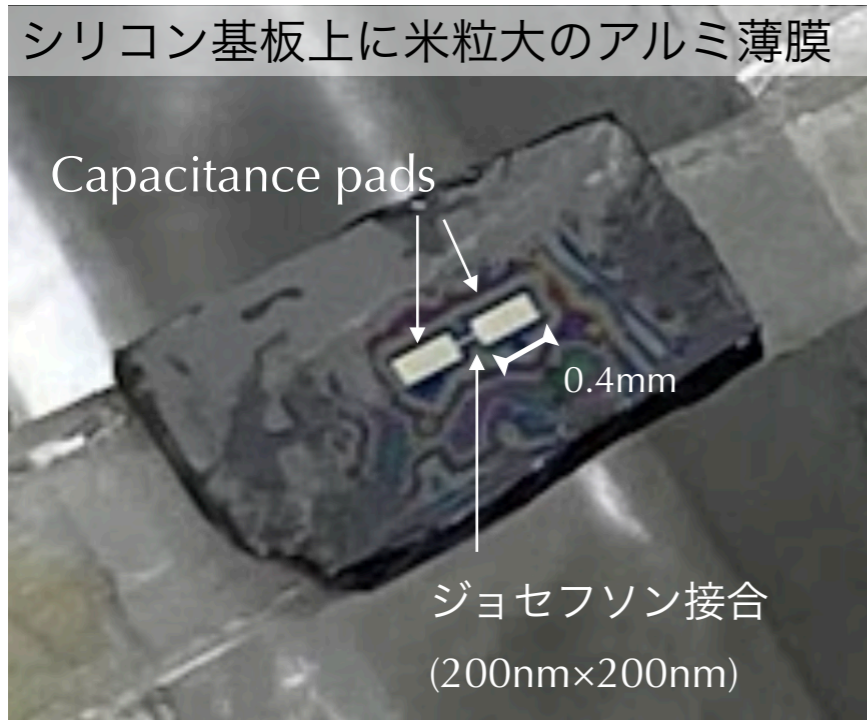
大規模量子コンピュータの ための高周波デバイス開発



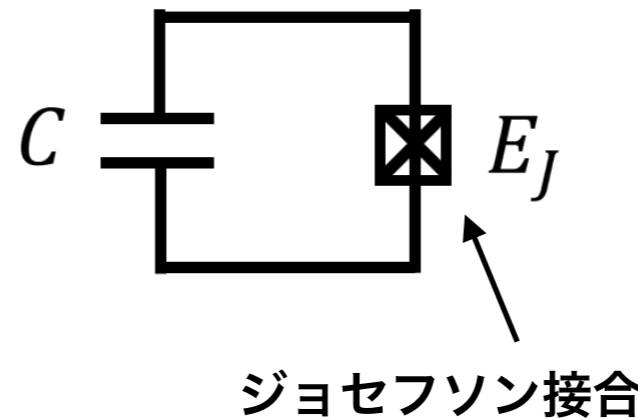
大規模素粒子実験のための 高温超伝導体センサーの開発



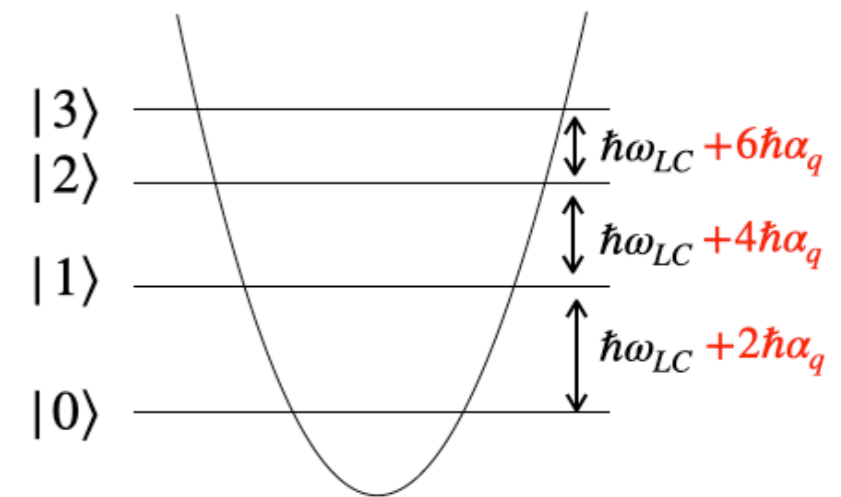
超伝導量子ビット = キンキンに冷えた非線形LC回路



$$\mathcal{H}_q \sim \hbar\omega_q a^\dagger a + \frac{\hbar\alpha_q}{2} a^\dagger a^\dagger a a$$



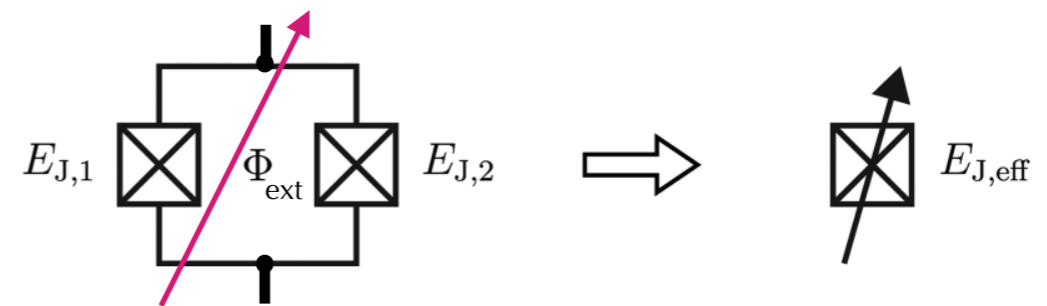
非調和性: $\alpha_q \sim (2e)^2/2C$



- 高周波では物は全てRLC回路
- 超伝導 → R~0
- Josephson junction : 非線形インダクタ
- 巨大なcapacitance → charge noise耐性
- 熱励起阻止するため希釈冷凍機 (10mK)

|| 2つの並列ループ = SQUID

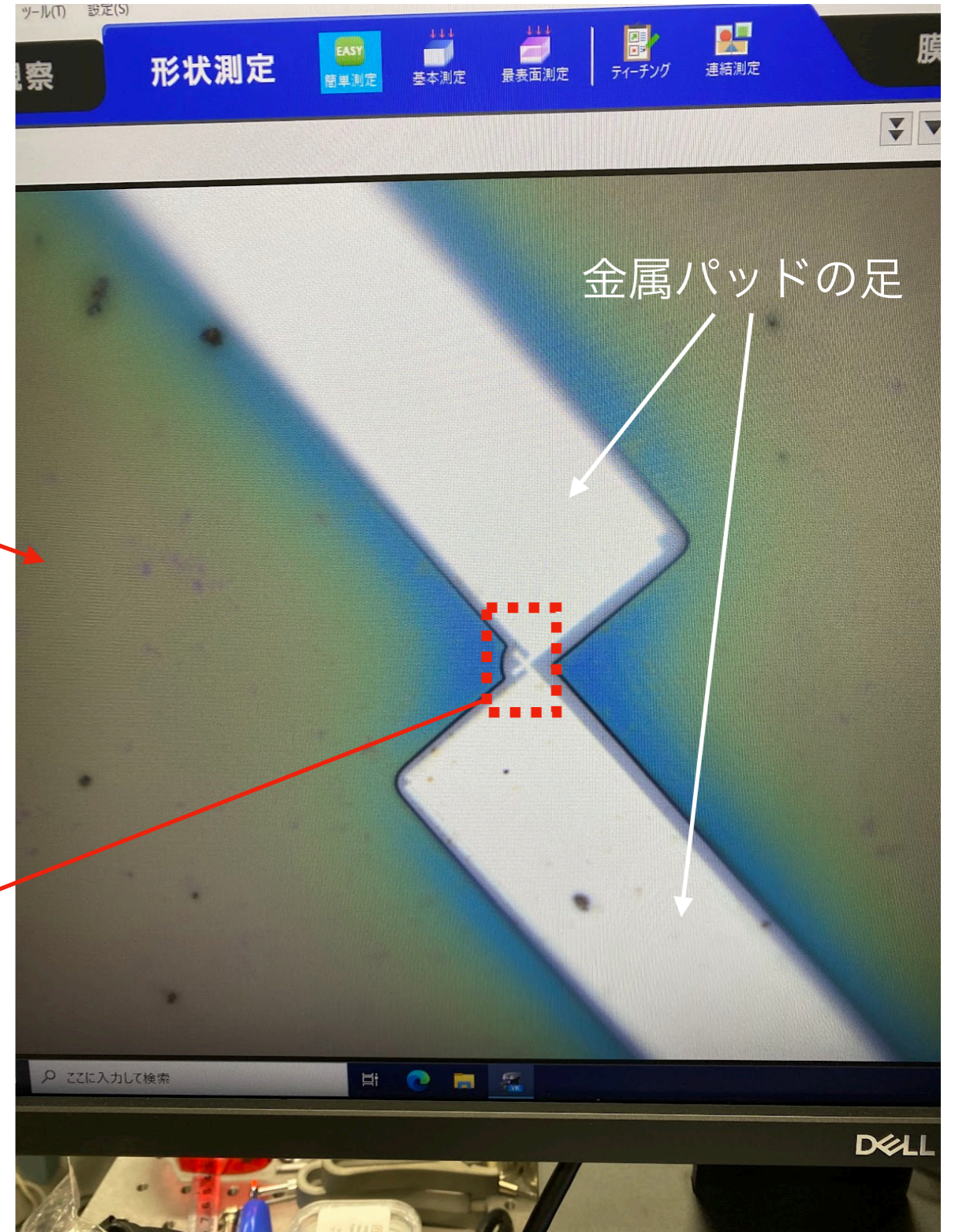
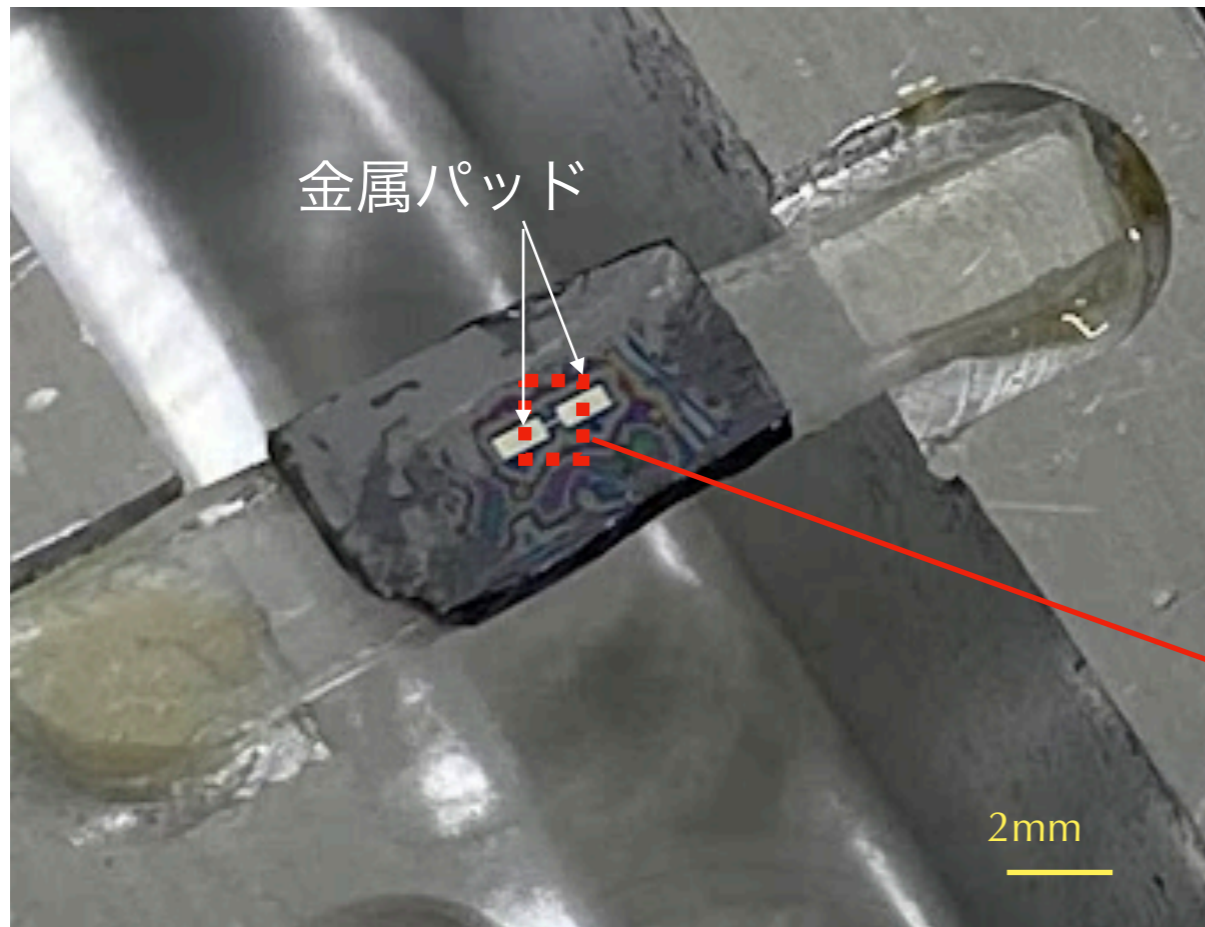
外部磁場で量子ビットの周波数可変に



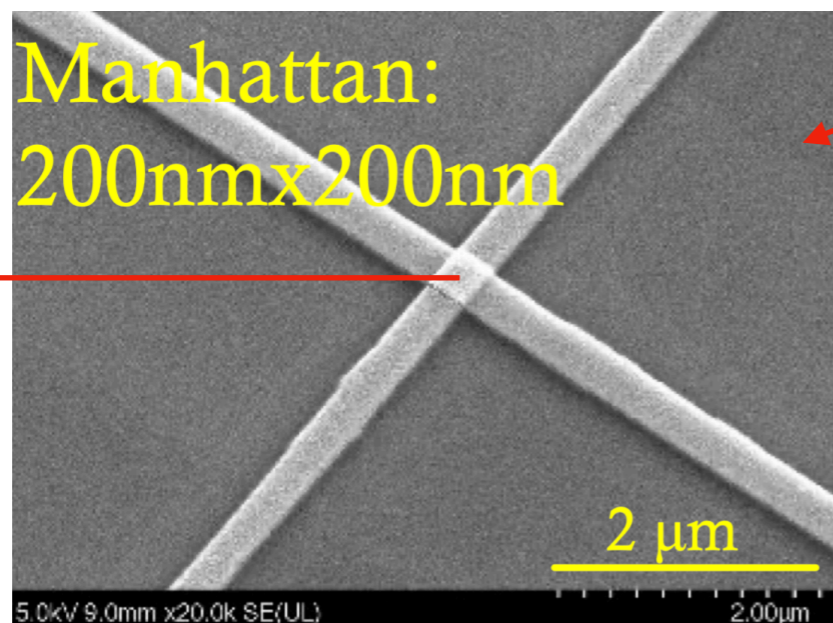
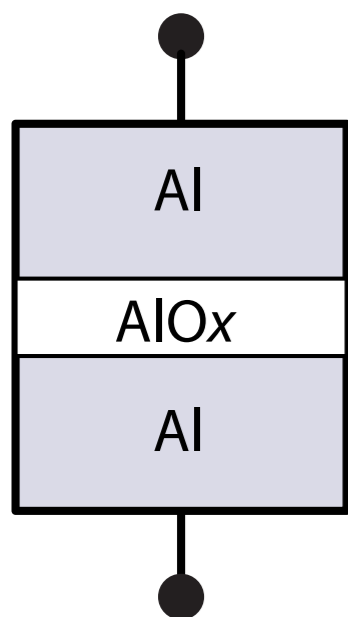
$$E_{J,eff}(\varphi_{ext}) = \sqrt{E_{J,1}^2 + E_{J,2}^2 + 2E_{J,1}E_{J,2} \cos \varphi_{ext}}$$

実際の姿

シリコン基板の上にアルミの薄膜 (~100nm) を蒸着

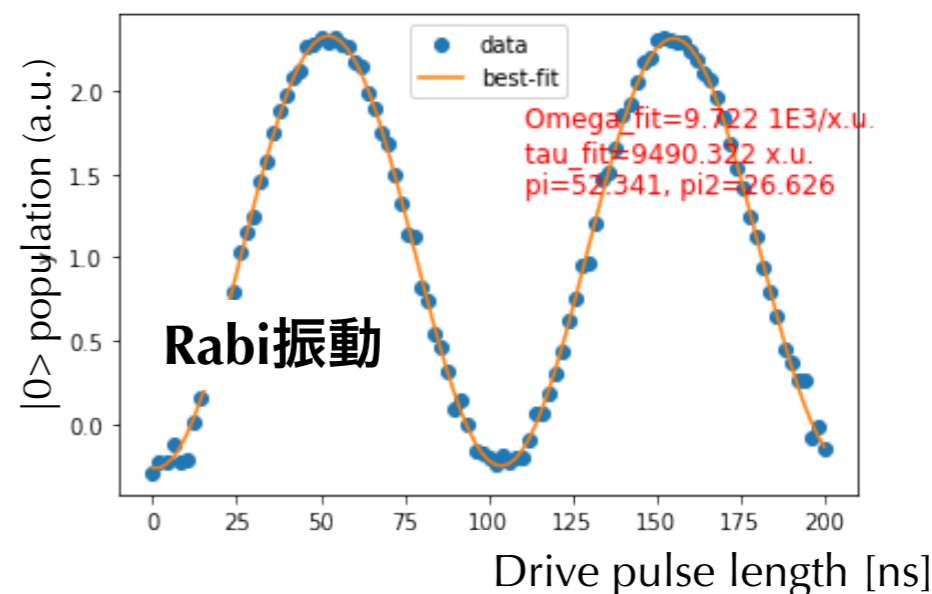
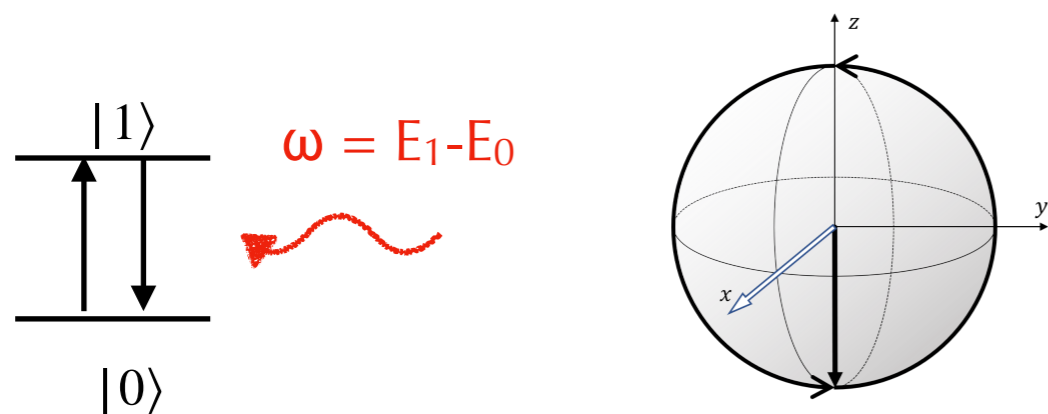


"斜め蒸着"で作る

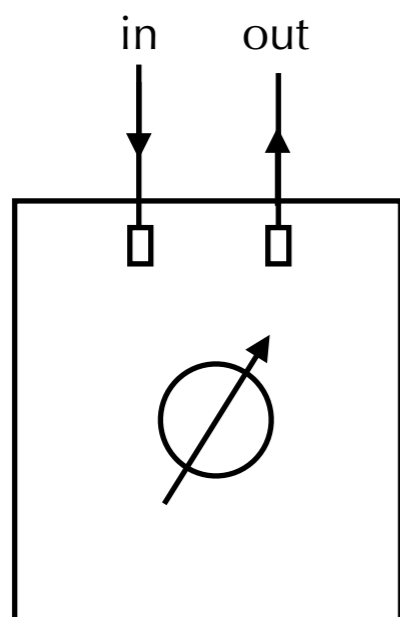


超伝導量子ビットの使い方

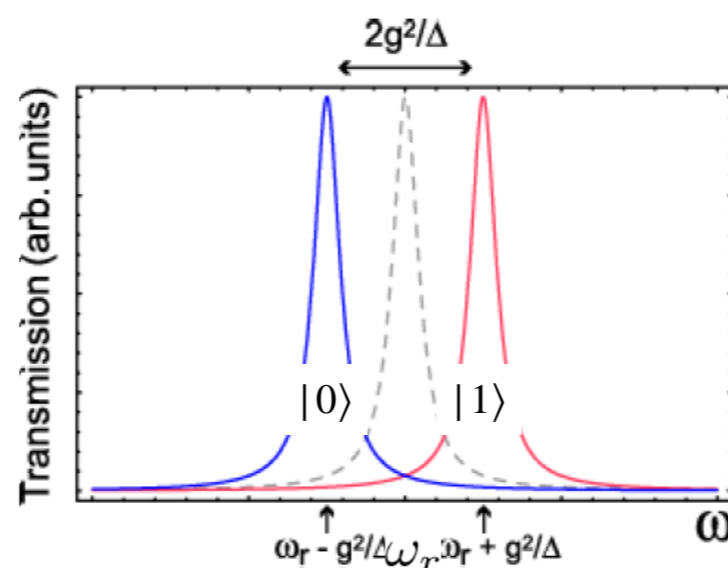
$|0\rangle \leftrightarrow |1\rangle$ 操作 量子ビットに共鳴したマイクロ波の照射



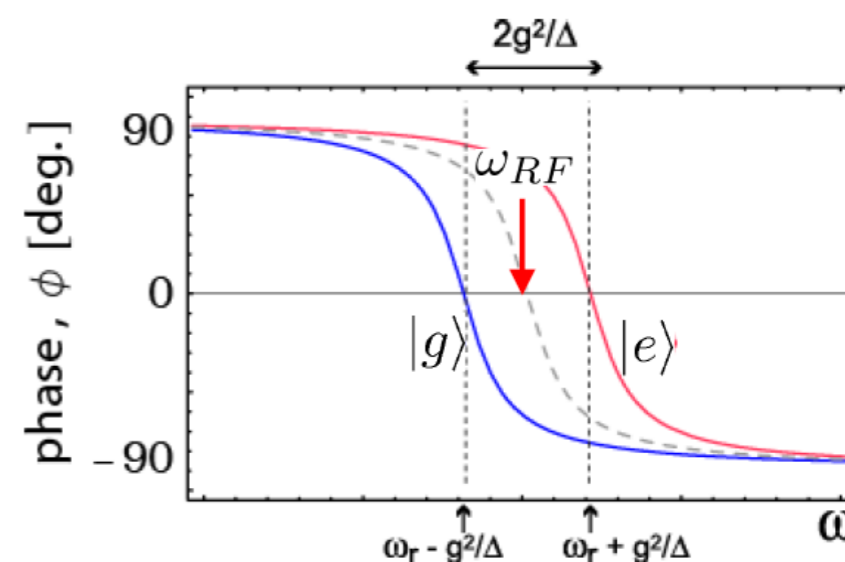
読み出し 共振器の透過測定 透過波の位相から判定



共振器のマイクロ波透過率



共振器の透過マイクロ波位相



量子ビットの状態に応じて共振周波数が変化

軽いダークマターは波である

軽いDM ($\sim \mu\text{eV}$): 超長いde Broie波長 ($\sim 100\text{m}$)

超高い数密度 ($\sim 10^{14}$ 個/ cm^3) \rightarrow 古典的な波



$O(100\text{ m})$

巨大で遅いレーザーパルス

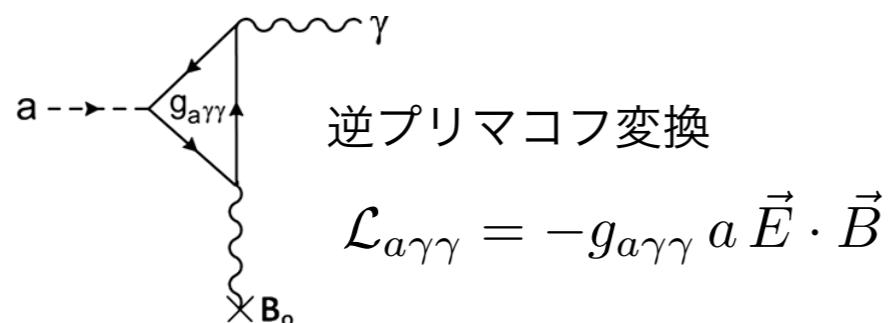
降り注いでいる



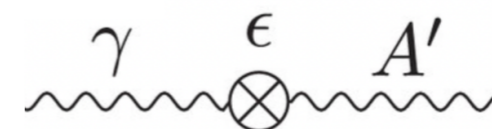
$v_a \sim 10^{-3}c$

$t_c \sim 1\text{ ms}$

Axion



Dark photon



mixing parameter

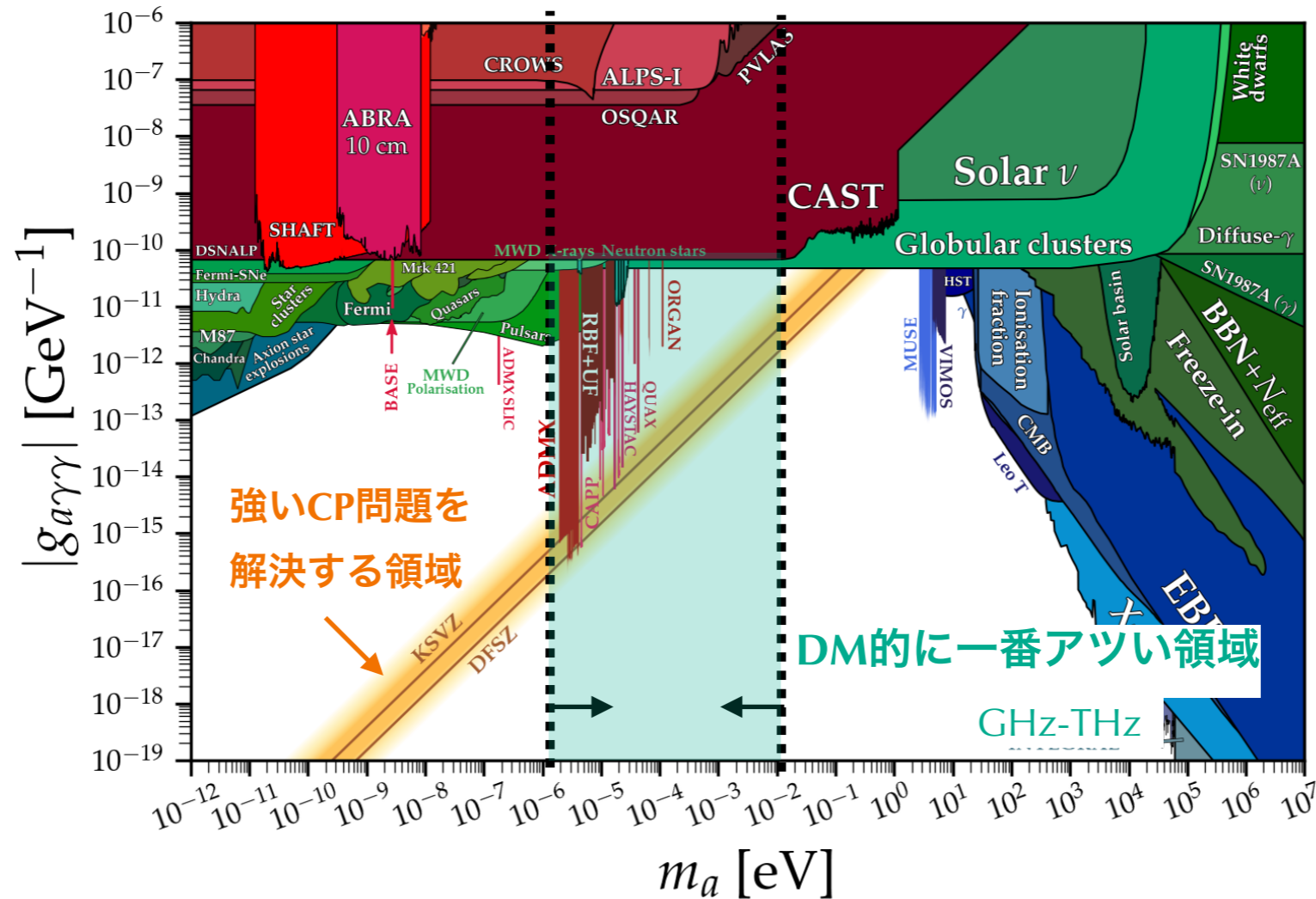
$$X^\mu = \tilde{X}^\mu - \epsilon A^\mu$$

Dark photon (質量固有状態) Dark photon (相互作用固有状態)

一般photon

Axion探索 現状

C. O'Hare et al.

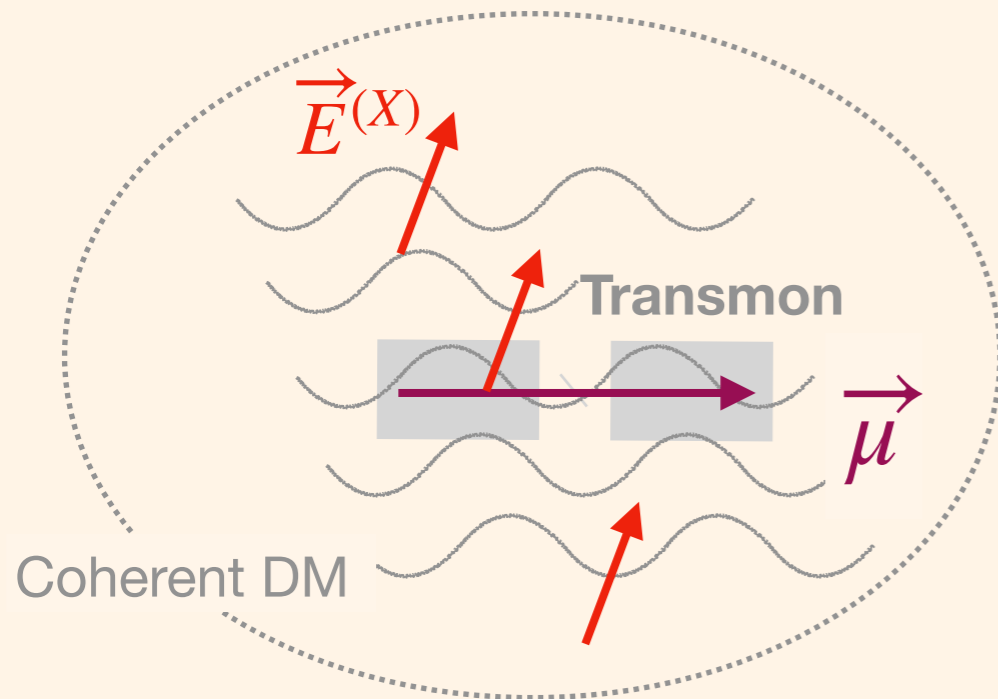


- 基本的にいかに弱い光を検出できるかの勝負
- 物理として一番面白いのはマイクロ波 (GHz-THz) 領域
奇しくもドンピシャ超伝導量子ビットの守備範囲

ダークマター由来の光でqubit励起

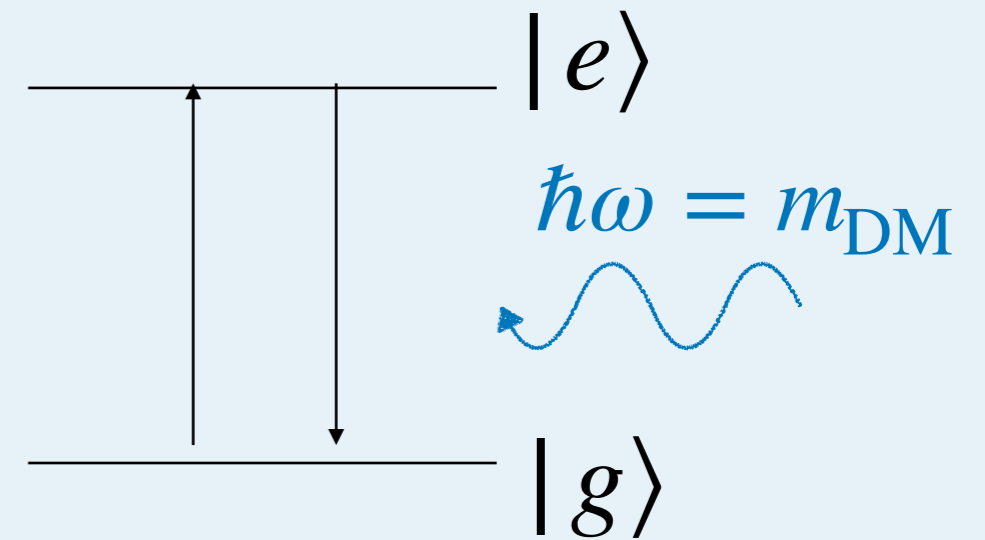
Chen et al. (2023)

E-field from the DM



=

Qubit drive pulse



Excitation rate after τ :

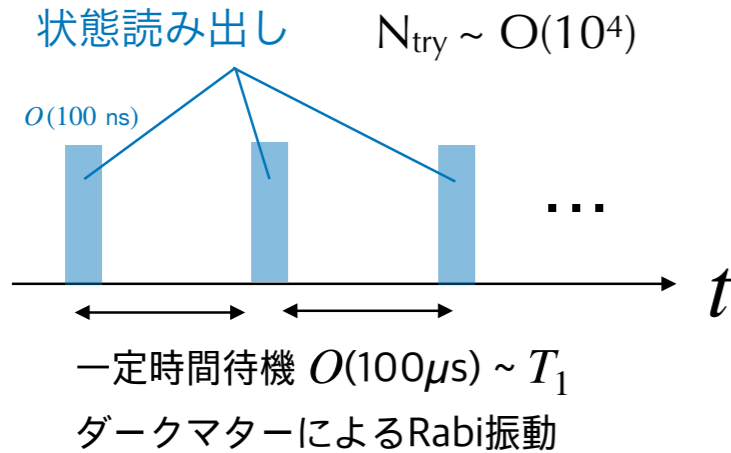
$$p \simeq 0.12 \times \kappa^2 \cos^2 \Theta \left(\frac{\epsilon}{10^{-11}} \right)^2 \left(\frac{f}{1 \text{ GHz}} \right) \left(\frac{\tau}{100 \text{ } \mu\text{s}} \right)^2 \left(\frac{C}{0.1 \text{ pF}} \right) \left(\frac{d}{100 \text{ } \mu\text{m}} \right)^2 \left(\frac{\rho_{\text{DM}}}{0.45 \text{ GeV/cc}} \right)$$

0.1-10% for $\epsilon=10^{-12}\sim 10^{-11}$

ダークマター由来の光でqubit励起

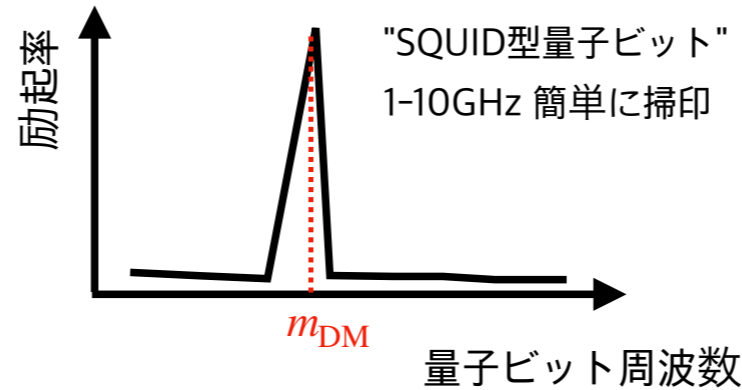
Chen et al. (2023)

「待つて測る」を繰り返す

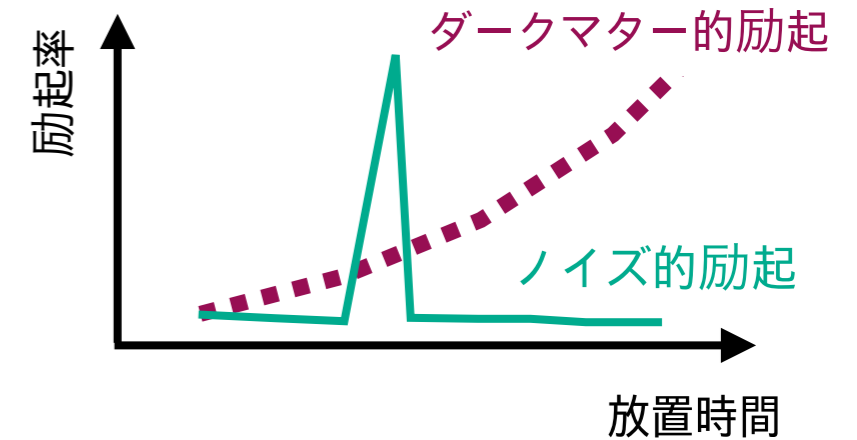


周波数スキャンでピーク探す

励起率 = $|e\rangle$ と読む割合 **0.01%-10%**



疑わしい周波数は真面目に調べる



○ $|g\rangle \rightarrow |e\rangle$ にするようなノイズは意外とない

熱励起: $p \sim e^{-\hbar\omega/kT}$ 0.01-1% @30mK

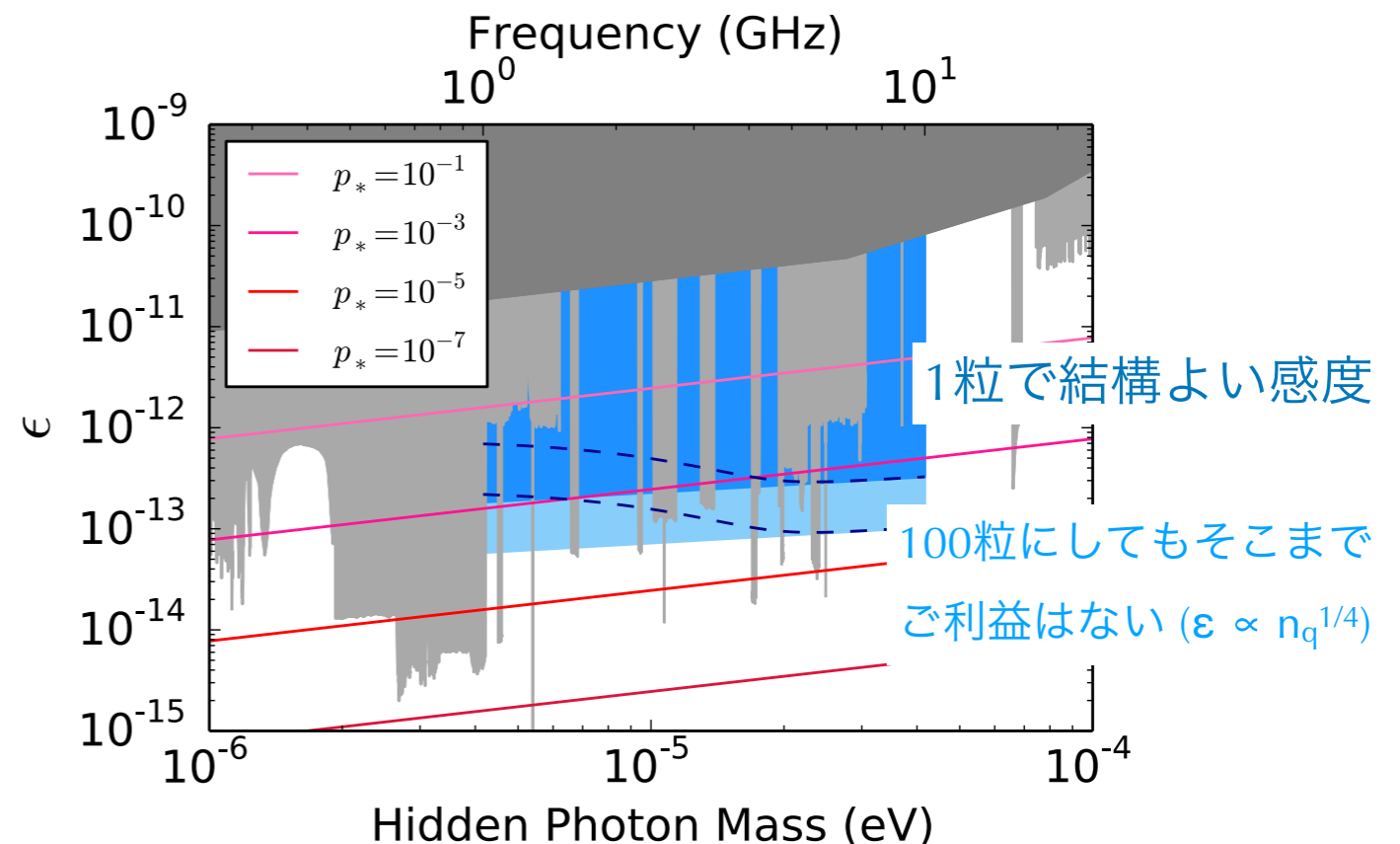
読み出しエラー: $\sim 0.1\%$

○ 量子ビットの寿命はそんないらない

寿命短い \rightarrow 読み出し回数でカバー

✓ 製作のハードル下がる

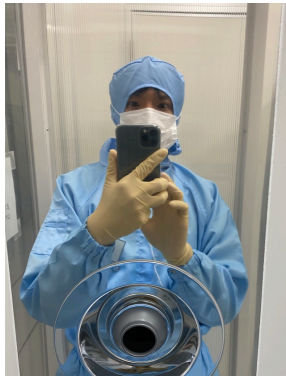
✓ 光子とより強結合な量子ビット使える



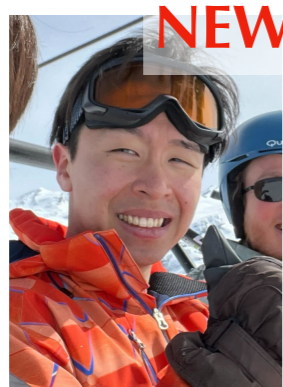
DarQ collaboration

京大+東大+理研による実験コラボレーション (2024-)

KyotoU HE



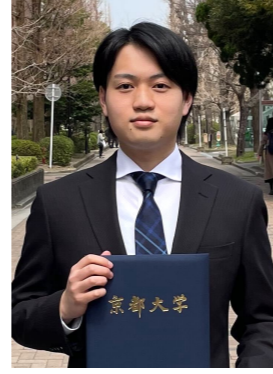
Shion Chen



Shotaro Abe

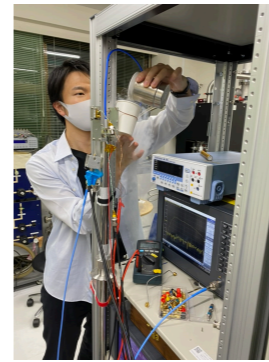


Kosuke Nakamura



Koki Aoyanagi

UTokyo ICEPP



Toshiaki Inada



Yuya Mino

[Link](#)



KEK QUP

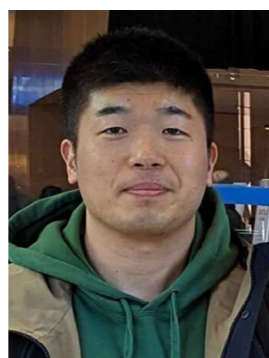


Tatsumi Nitta

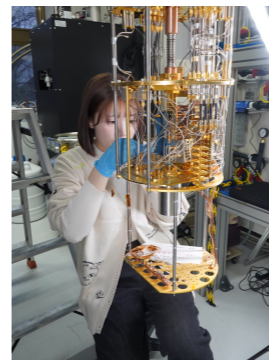
UTokyo Noguchi Lab / RIKEN RQC



Atsushi Noguchi



Shotaro Shirai



Karin Watanabe



Kan Nakazono



Chikara Kawai

UTokyo Moroi Lab



Takeo Moroi



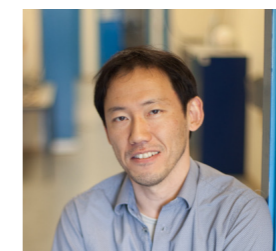
Hajime Fukuda



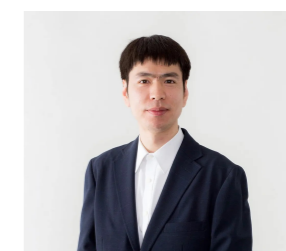
Thanaporn Sichanugrist
(→QunaSys)



Yutaro Iiyama



Koji Terashi

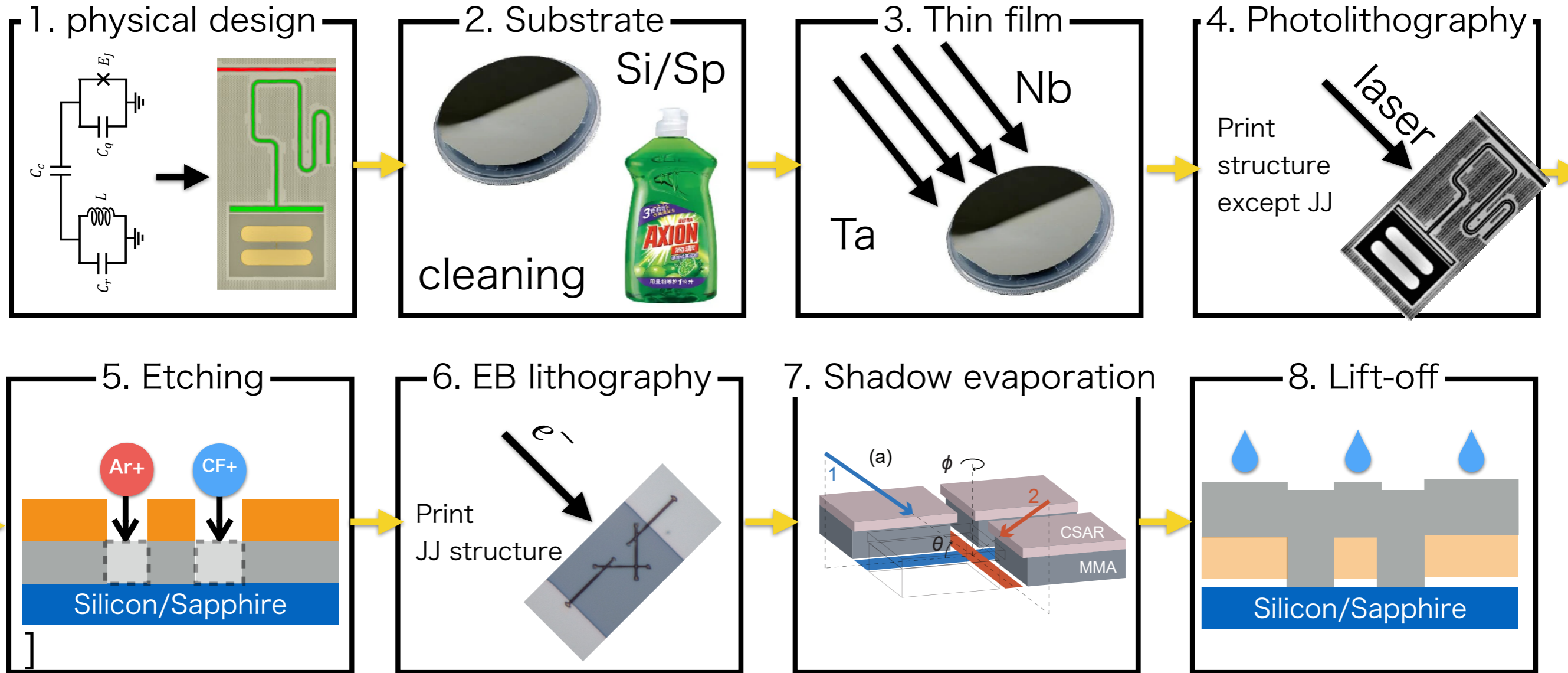


Ryu Sawada



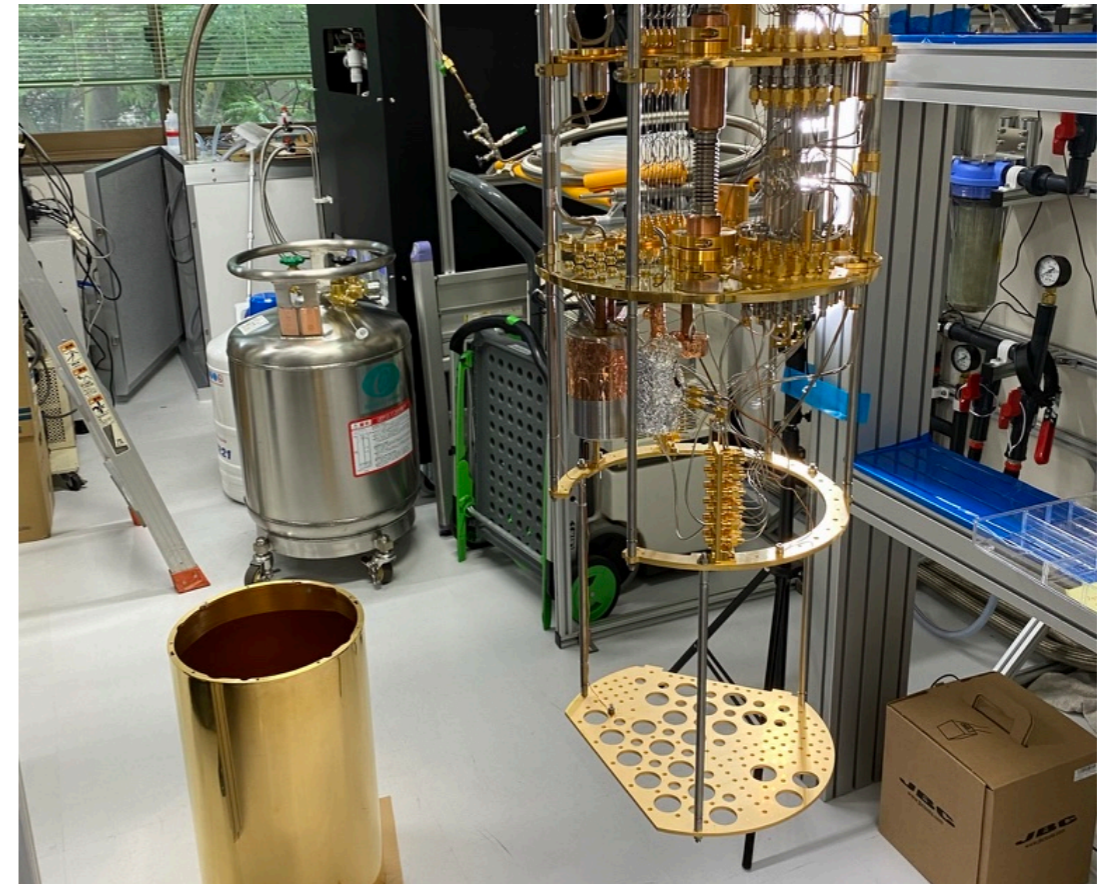
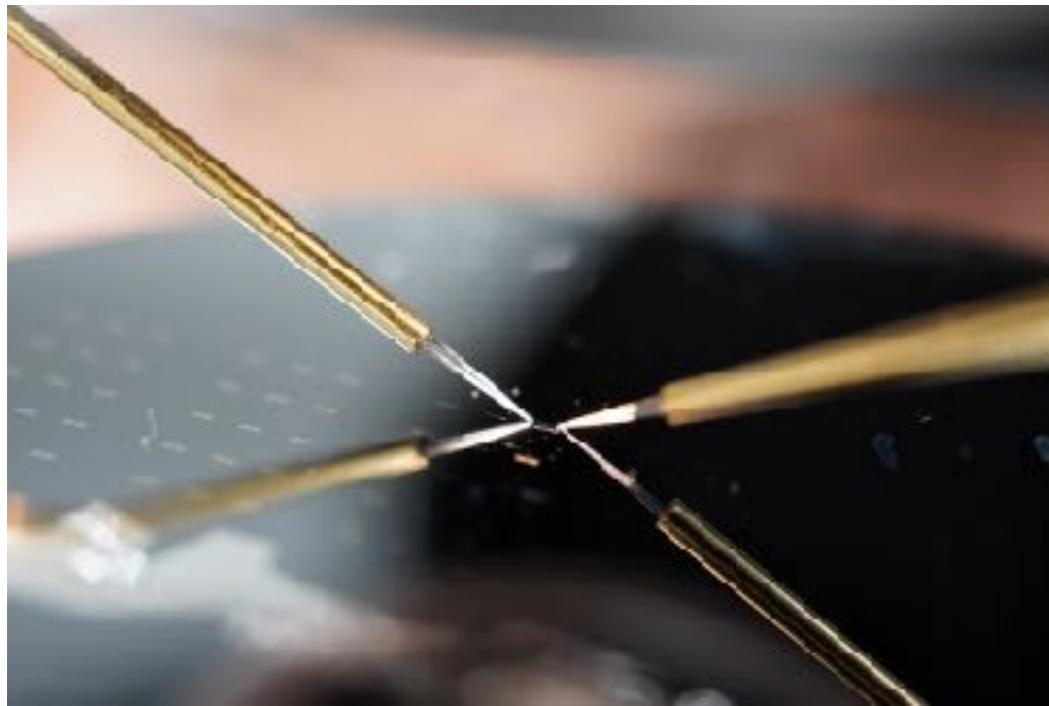
超伝導量子ビットを作る

Step-7 : @OIST (沖縄)
それ以外 : @京都

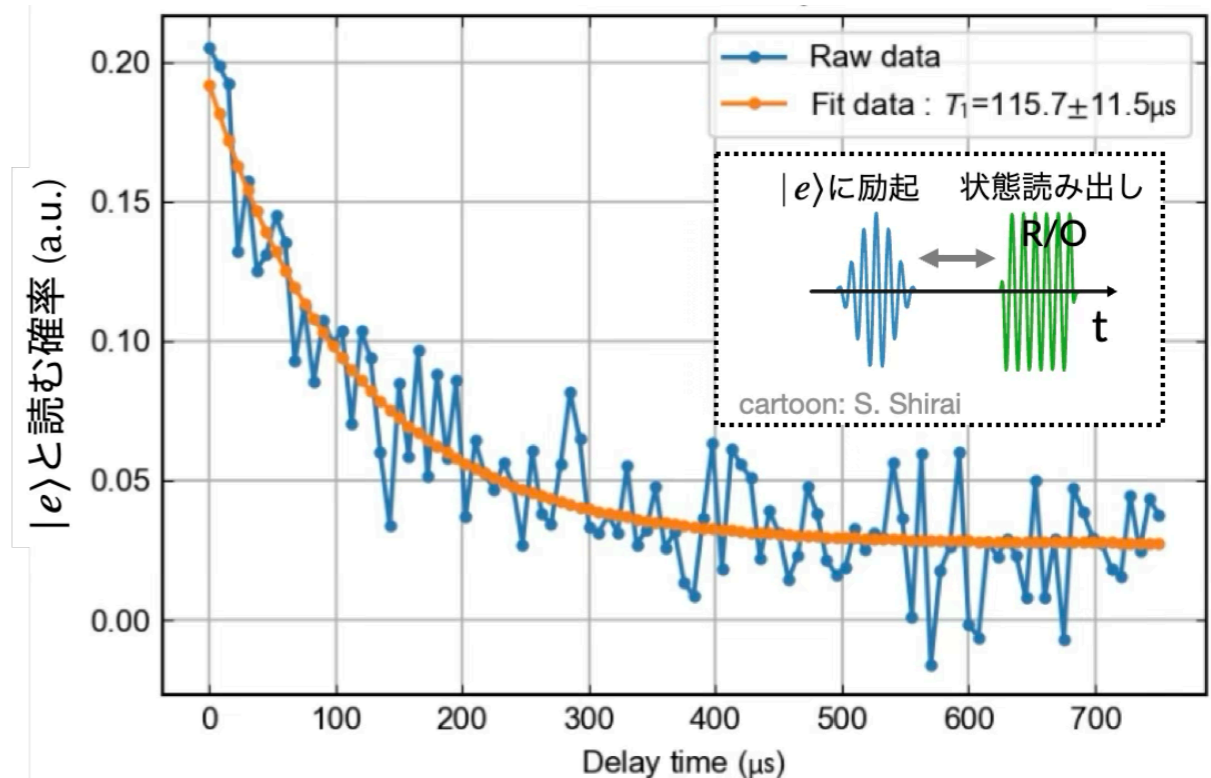


※ 青柳 : 新技「斜め・斜め蒸着」を発明 (2025) - 論文準備中
よりシンプルに安定して作れるようになる可能性あり

超伝導量子ビットを測る

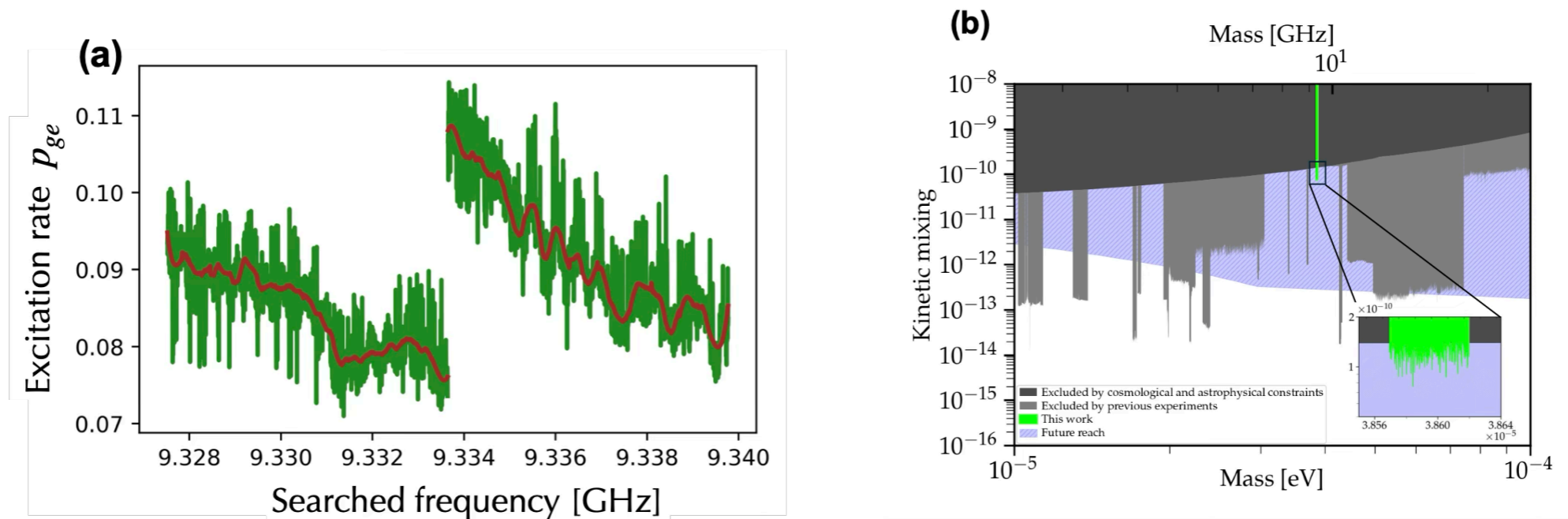


- 室温抵抗測定で有望なやつを選別
- 希釈冷凍機で冷却
- 性能指標：コヒーレンス時間
 $T_1 \sim 10\mu\text{s}$, $T_2 \sim \text{数}\mu\text{s}$ をコンスタントに達成
(最大で $T_1, T_2 \sim 100\mu\text{s}$)
- センサー応用には十分なクオリティ

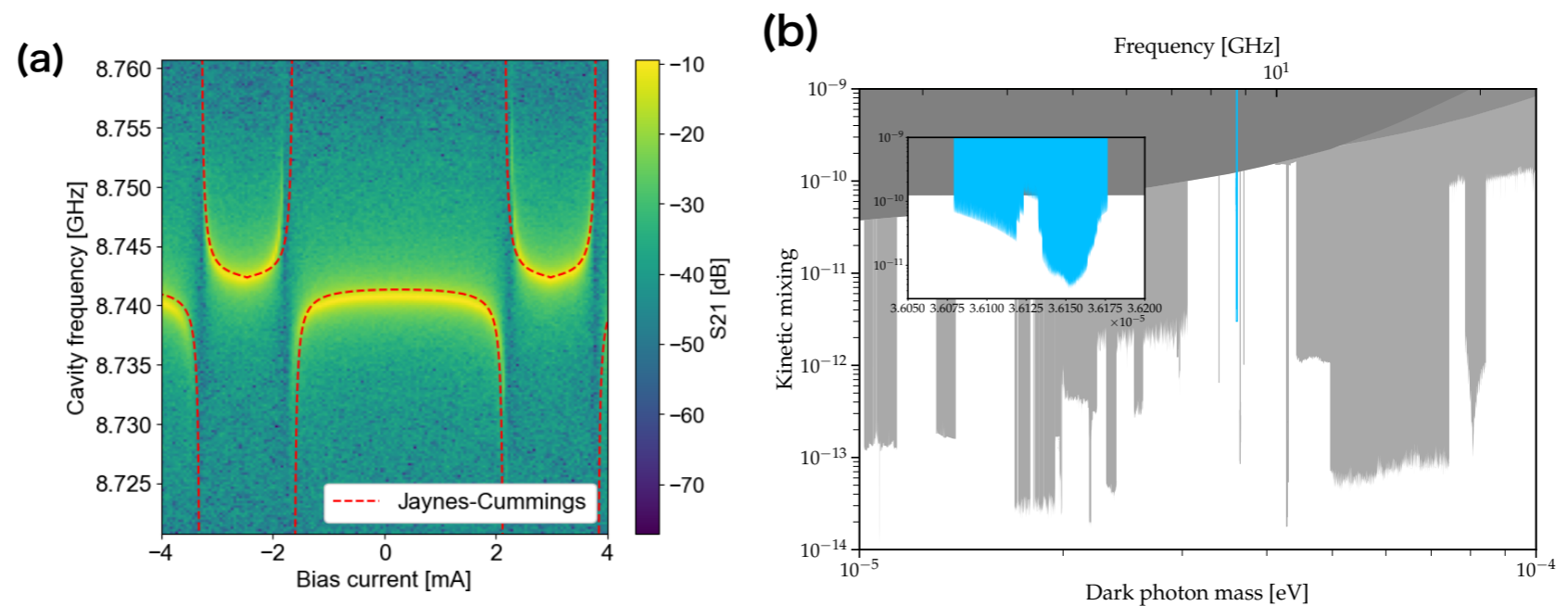


最初の物理成果が出てきている

DarQ-Direct 量子ビットをそのままセンサーにして探索

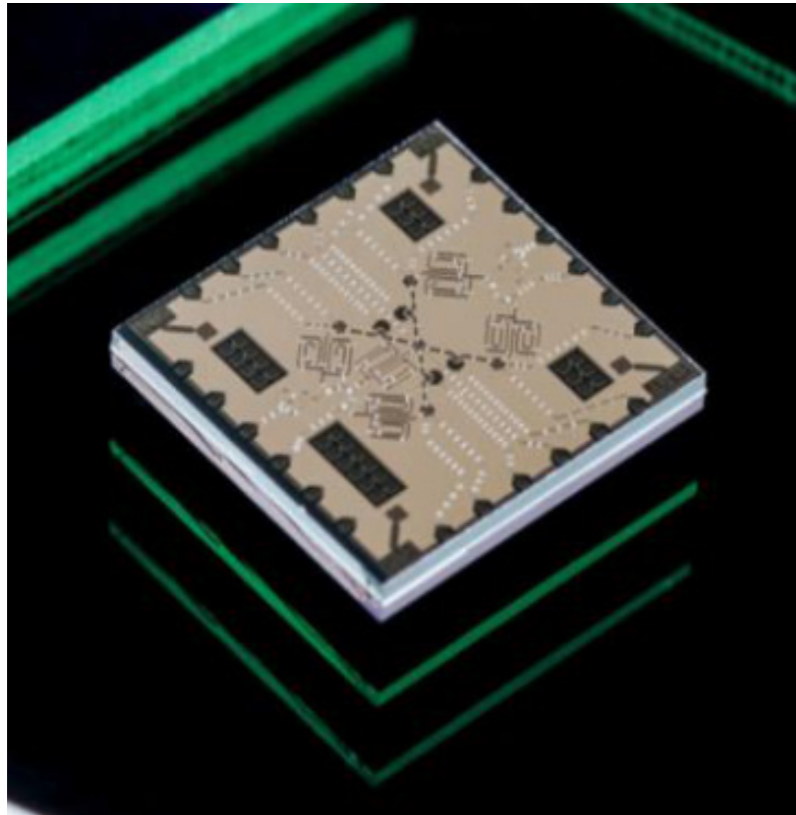


DarQ-Lamb 量子ビットを共振器の周波数調整器として使った共振器実験



[arXiv: 2505.15619](https://arxiv.org/abs/2505.15619)

量子コンピューターをそのまま使う？



去年IQMと共同研究開始

Forbesに載りました

Emerald processor (54 bit)

😊 Array of high quality qubits

😊 Regular calibration

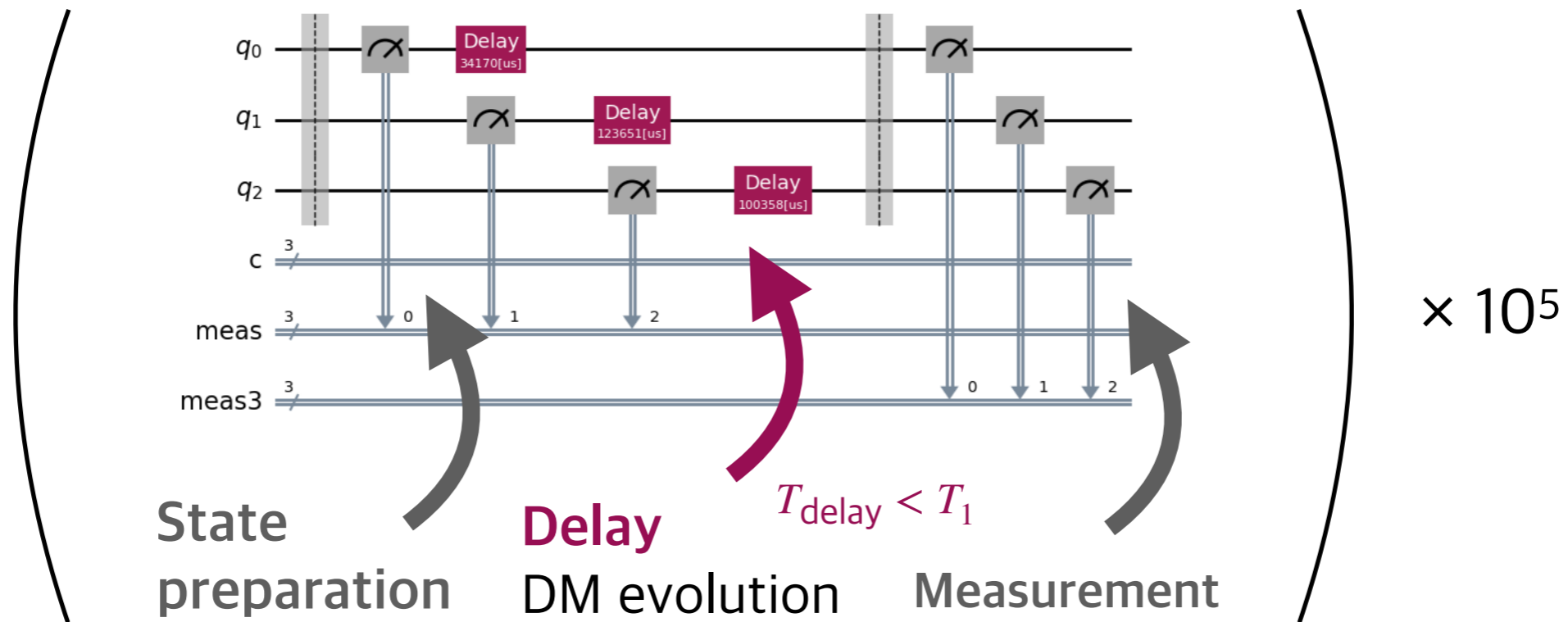
😊 Optimal readout & control

😞 Fixed frequency

😞 No B-field (→ dark photon only)

😞 Qubit parameter unknown
Discovery only, no limits

e.g. $n_q=3$ $n_q=127$ in actual experiment



```

def submit(delay, shots=100000, ncircuits=600, session=None, batch=None):
    circuits = []
    for i in range(ncircuits):
        qr = QuantumRegister(nq)
        cr0 = ClassicalRegister(nq)
        cr1 = ClassicalRegister(nq)
        # Create a quantum circuit with 3 qubits and 3 classical bits
        qc = QuantumCircuit(qr, cr0, cr1)
        qc.measure(qr, cr0)
        # Add a delay of T1/2 to each qubit
        for iq in range(nq):
            qc.delay(int(T1/2*1000*delay_factor), iq, 'qs')
            qc.delay(int(delay), iq, 'us')
        # Measure each qubit
        qc.measure(qr, cr1)
        # Visualize the circuit
        qc.draw('mpl')
        circuits.append(qc)
    circuits[0].draw('mpl')
    qc_compiled = transpile(circuits, backend, initial_layout = list(range(nq)), optimization_level=0, scheduling_method='asap')
    sampler = None
    if session:
        sampler = Sampler(session=session)
    elif batch:
        sampler = Sampler(mode=batch)
    job = sampler.run(qc_compiled, shots=shots)
  
```

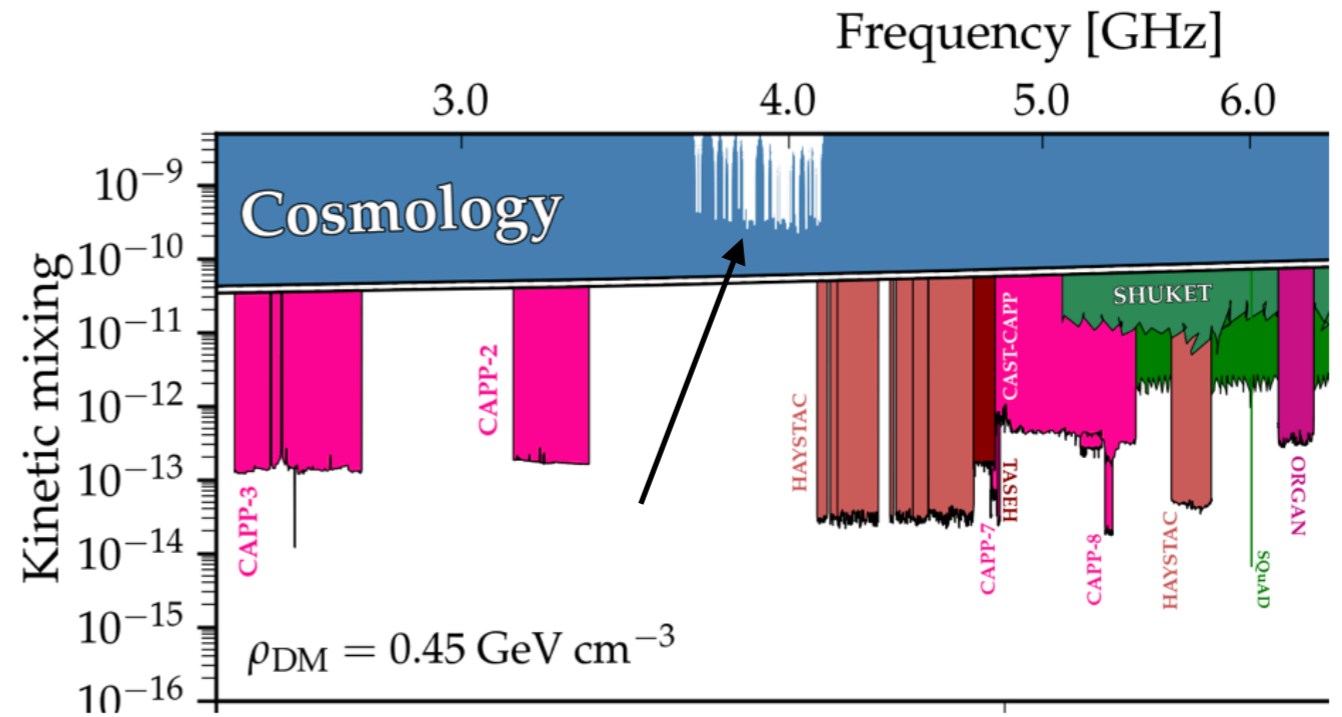
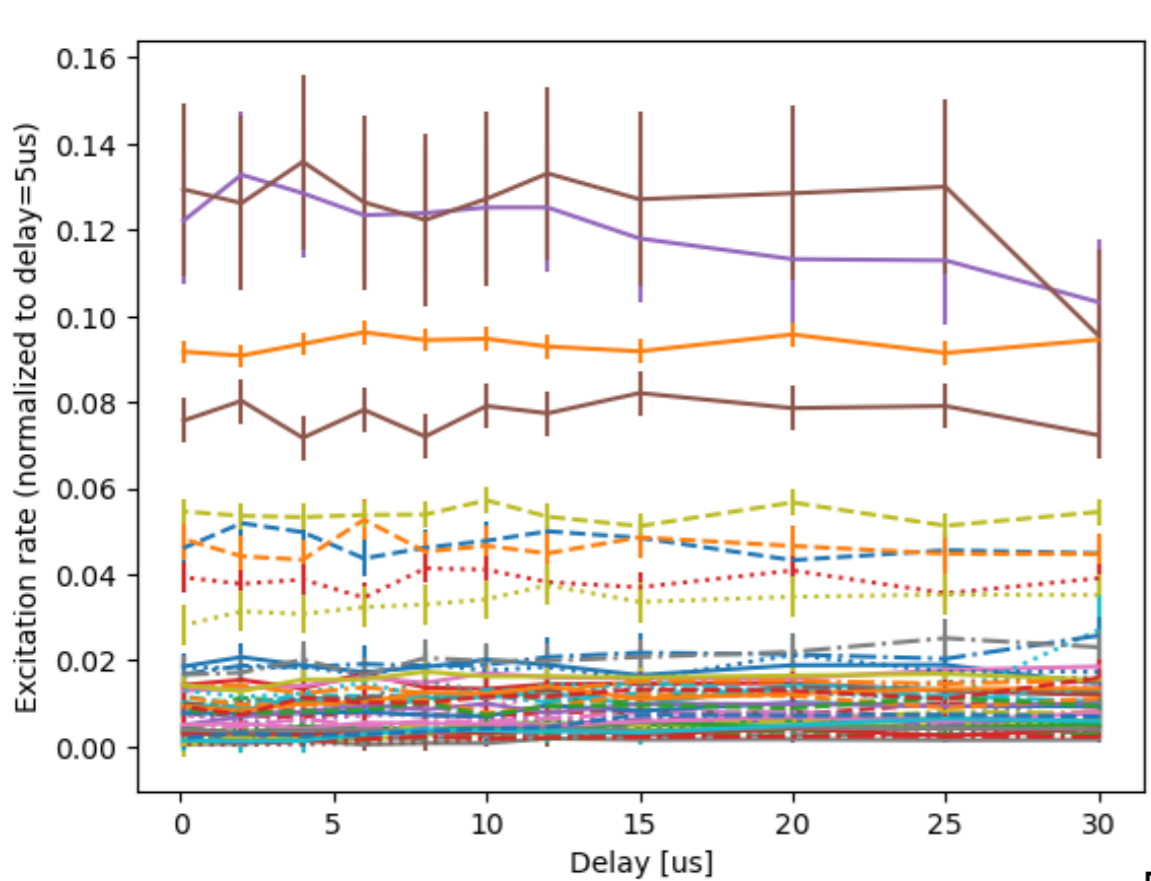
ID / Name	Status	Created	Completed	Usage	Type	Compute resource	Tags
cvhtxdxkmd10008...	Completed	13 Sep 2024	13 Sep 2024	1m 8s	sampler	ibm_kawasaki	
cvhtx14z17rg008d...	Completed	13 Sep 2024	13 Sep 2024	1m 7s	sampler	ibm_kawasaki	
cvhtwm2vawwg00...	Completed	13 Sep 2024	13 Sep 2024	1m 6s	sampler	ibm_kawasaki	
cvhtw7gkmd10008...	Completed	13 Sep 2024	13 Sep 2024	1m 6s	sampler	ibm_kawasaki	
cvhtvtq8w2g0008e...	Completed	13 Sep 2024	13 Sep 2024	1m 8s	sampler	ibm_kawasaki	
cvhtve5p7drg008m...	Completed	13 Sep 2024	13 Sep 2024	1m 12s	sampler	ibm_kawasaki	
cvhtv1cp7drg008m...	Completed	13 Sep 2024	13 Sep 2024	1m 10s	sampler	ibm_kawasaki	
cvhttm8w2g0008e...	Completed	13 Sep 2024	13 Sep 2024	1m 9s	sampler	ibm_kawasaki	

Submit a script like this

5min queue, 1min run time

✔ Script-based dark matter search

量子コンピューターをそのまま使う



ほぼタダの割にそこそこの感度

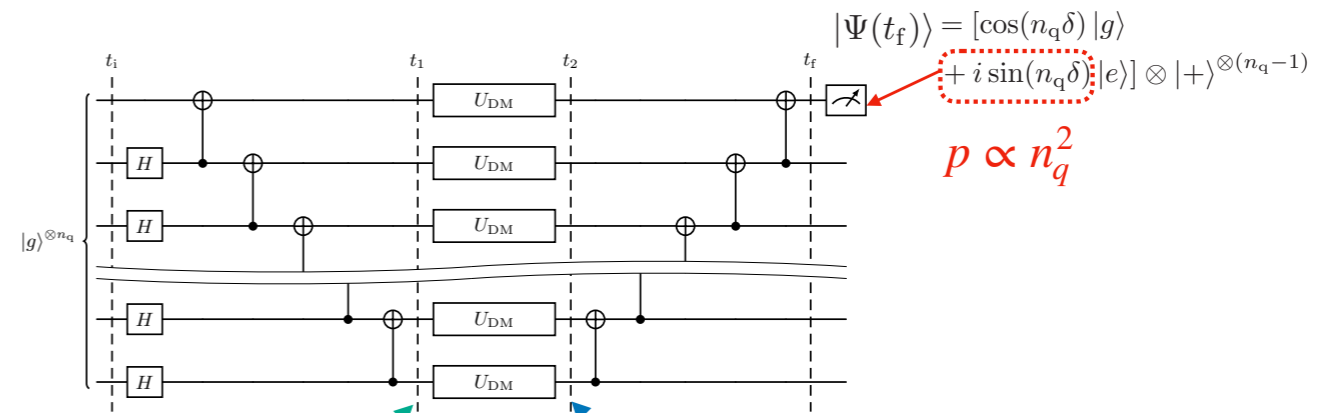
- ただしチップ蓋による信号遮蔽：~1/200

いまやっていること：

- 周波数スキャン
- 専用蓋の開発？
- 量子干渉による信号増幅の実現

Multibit entanglement → **signal rate** $\propto n_q^2$

"Decoded" state to be measured



GHZ state: Maximally entangled state

DM evolution: Rabi oscillation

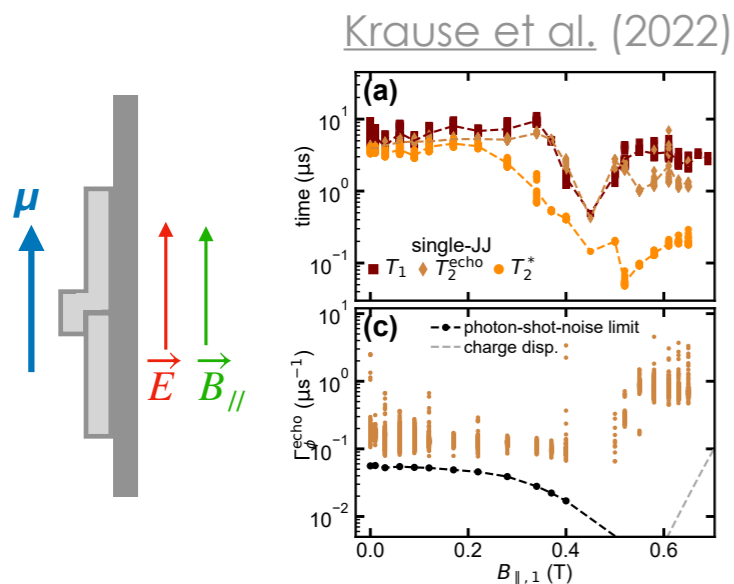
$$|\Psi(t_1)\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|+\rangle^{\otimes n_q} + |-\rangle^{\otimes n_q})$$

$$|\Psi(t_2)\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (e^{in_q\delta} |+\rangle^{\otimes n_q} + e^{-in_q\delta} |-\rangle^{\otimes n_q})$$

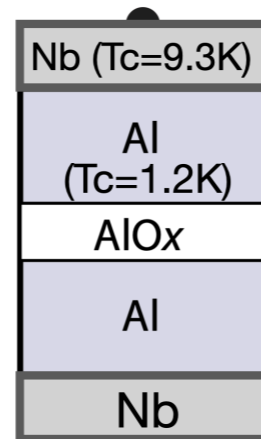
新しい量子センサー・新しい量子測定

強磁場耐性qubit (中村)

Axion探索に向けて



高周波qubit (青柳)

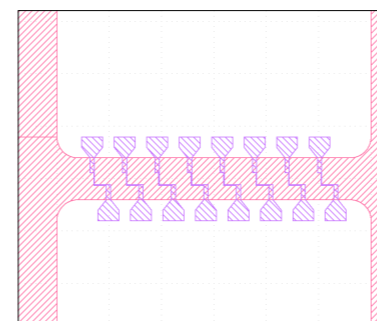


$$E_1 - E_0 \sim \sqrt{8E_C E_J}$$

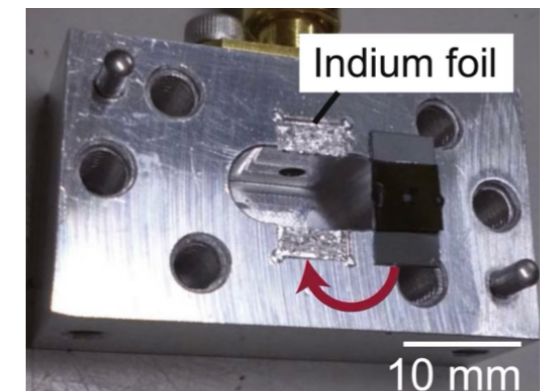
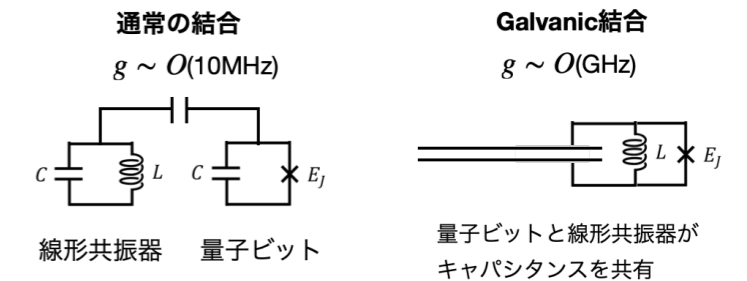
$$E_J = \frac{\pi \Delta}{2 R}$$

Δ : 超伝導ギャップ

タコ足qubit



強結合qubit (阿部)

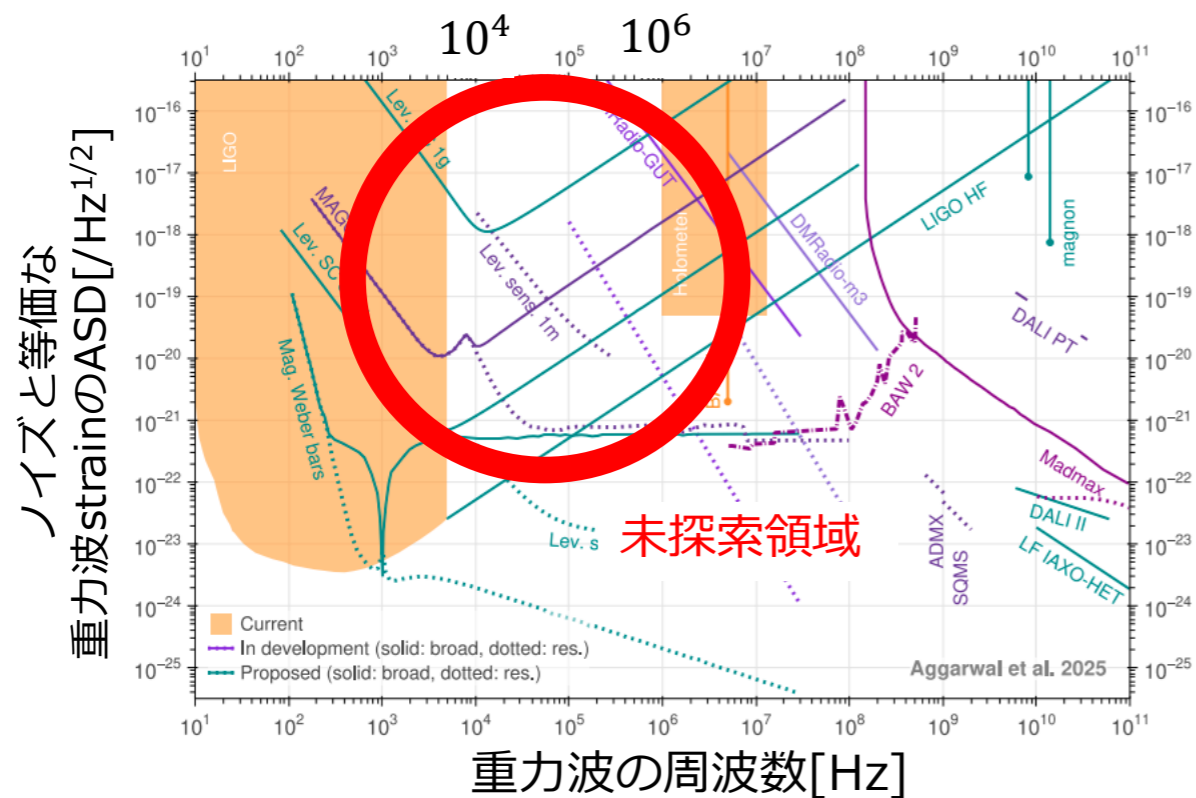


ハードウェアだけでなく、こういった量子状態をどうやって使うかもopen question

- 量子ビット+共振器系の非線形状態 (e.g. CAT state) を使った増幅
- センシングのための量子回路 (e.g. STAR code - 量子誤り訂正)

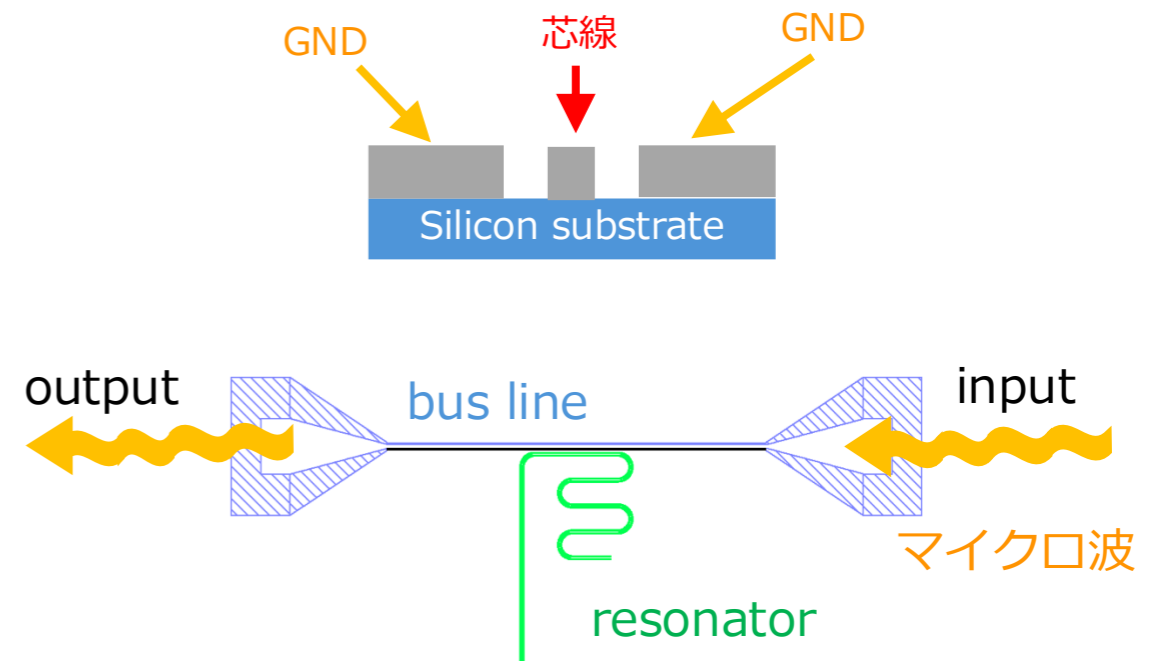
などの理論寄りの研究もDarQでやっている。

2次元共振器を使った高周波重力波探索 (中村)



Nancy Aggarwal et al.,
Challenges and Opportunities of Gravitational Wave Searches above 10 kHz,
arXiv:2501.11723 (2025)

CPW = "2次元"同軸ケーブル

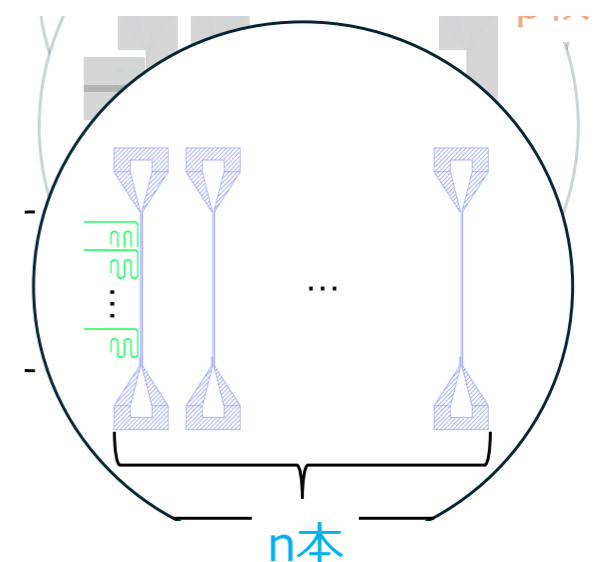


普通の天体からでは出ない高周波 (>kHz) の重力波

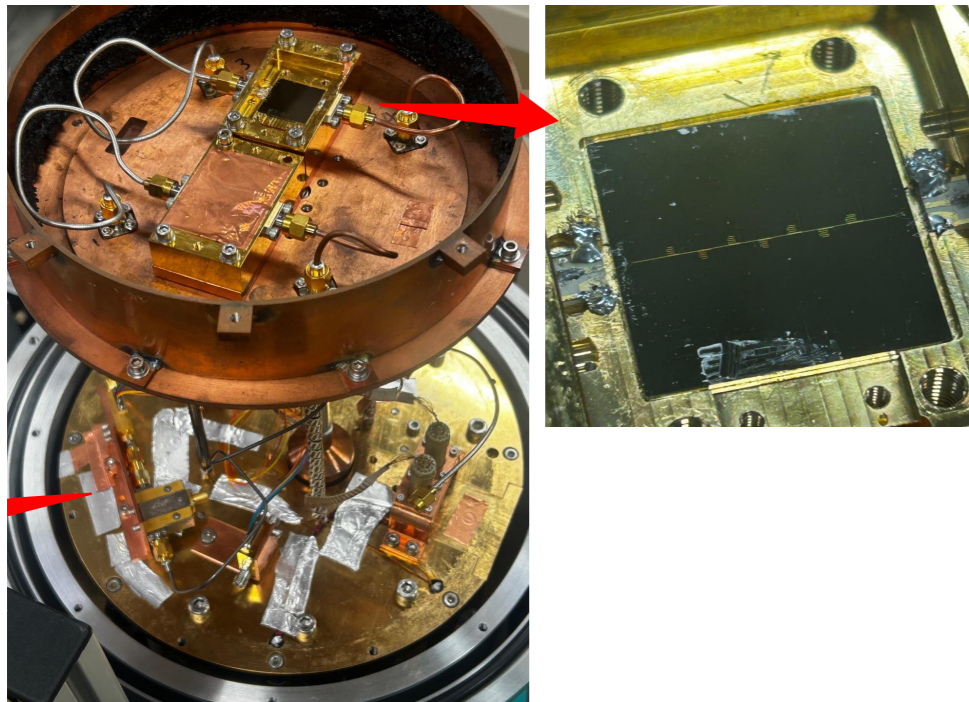
- 原始ブラックホールの合体, axion超放射
- 誰も探したことがない - 宇宙ではこれはかなりのチャンス

重力波 → CPW共振器の伸び縮み → 共振周波数の周期変動

- 透過波の位相が振動するのを捉える
- 10cm離れた複数共振器 → 偏光・到来方向も一応特定可能



2次元共振器を使った高周波重力波探索 (中村)



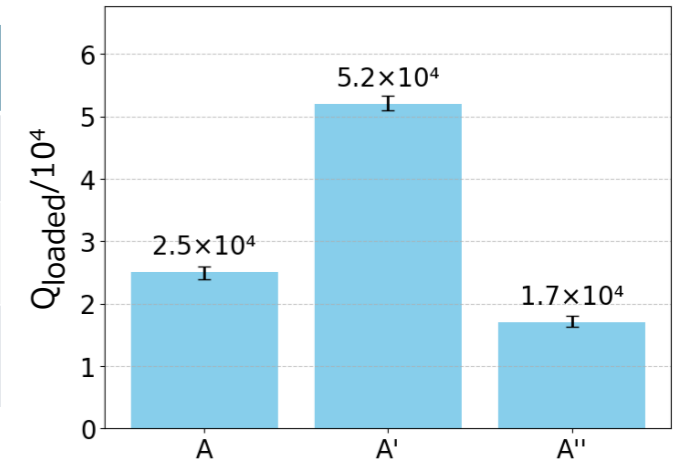
測定1: 洗浄工程による Q_{loaded} の違い

サンプル

A(アッシング後、NMP+アセトンで洗浄)

A'(アッシング後、NMP+アセトンで超音波洗浄)

A'' (A'にレジスト塗布しその後NMP+アセトンで洗浄)



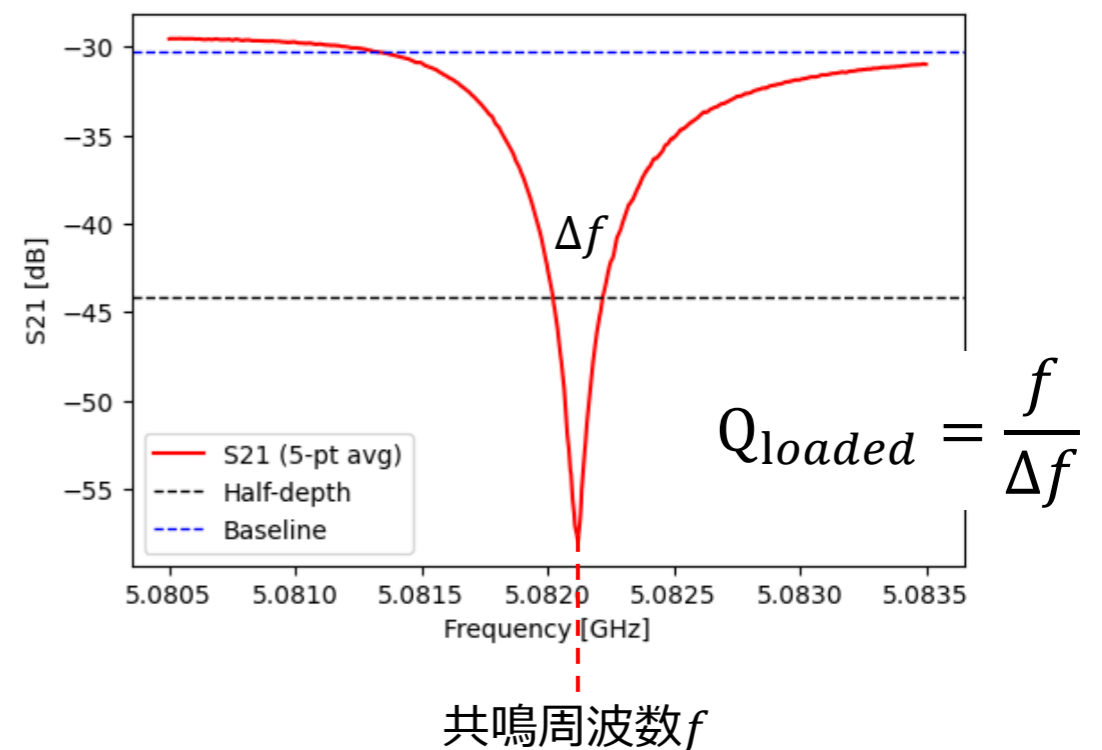
基本的なセットアップはすでにある @5号館

- ✓ 冷凍機
- ✓ 共振器

次は:

- 読み出し回路 (信号位相の高速測定)
- 擬似信号の読み出しテスト

年内の初観測を目指す



M1のネタ

修士終了でも博士進学でもOK

詳細は[ここ](#)を参照

- **物理 (ダークマター/重力波) でテーマを1つ選ぶ**
光をどう貯めるか × 光を量子ビットでどうやって読むかで色々な方式
- **それに活かせる新規センサー・センシングの方法を開発**
サンプル製作・低温実験・測定・理論のどこに興味があるかで応相談

実験スキーム vs 開発要素 @ダークマター探索

	Cavity	Dish	Free space
Antenna	中園		x
Direct excitation	高速qubit変調		
	方向感度		渡邊
Single photon counting	Galvanic qubit + Cloaking 中村?	露出 qubit	
		球状 cavity	Itinerant SPC 河井
		Wideband Ramsey	x

もっとよく知りたい人は

お手軽なスライド

- "量子で素粒子" @Higgs Factory summer school 2025
- KMI school 2024 (新田: fabまとめ)
- KMI school 2024 (ちん: 測定まとめ)

レビュー論文・解説記事

- "超伝導量子ビット研究の進展と応用" 中村泰信
- "超伝導回路を用いた量子計算機の研究を理解するための基礎知識" 山本剛
- "Practical Guide for Building Superconducting Quantum Devices" Y. Y. Gao et al. (2021)

教科書

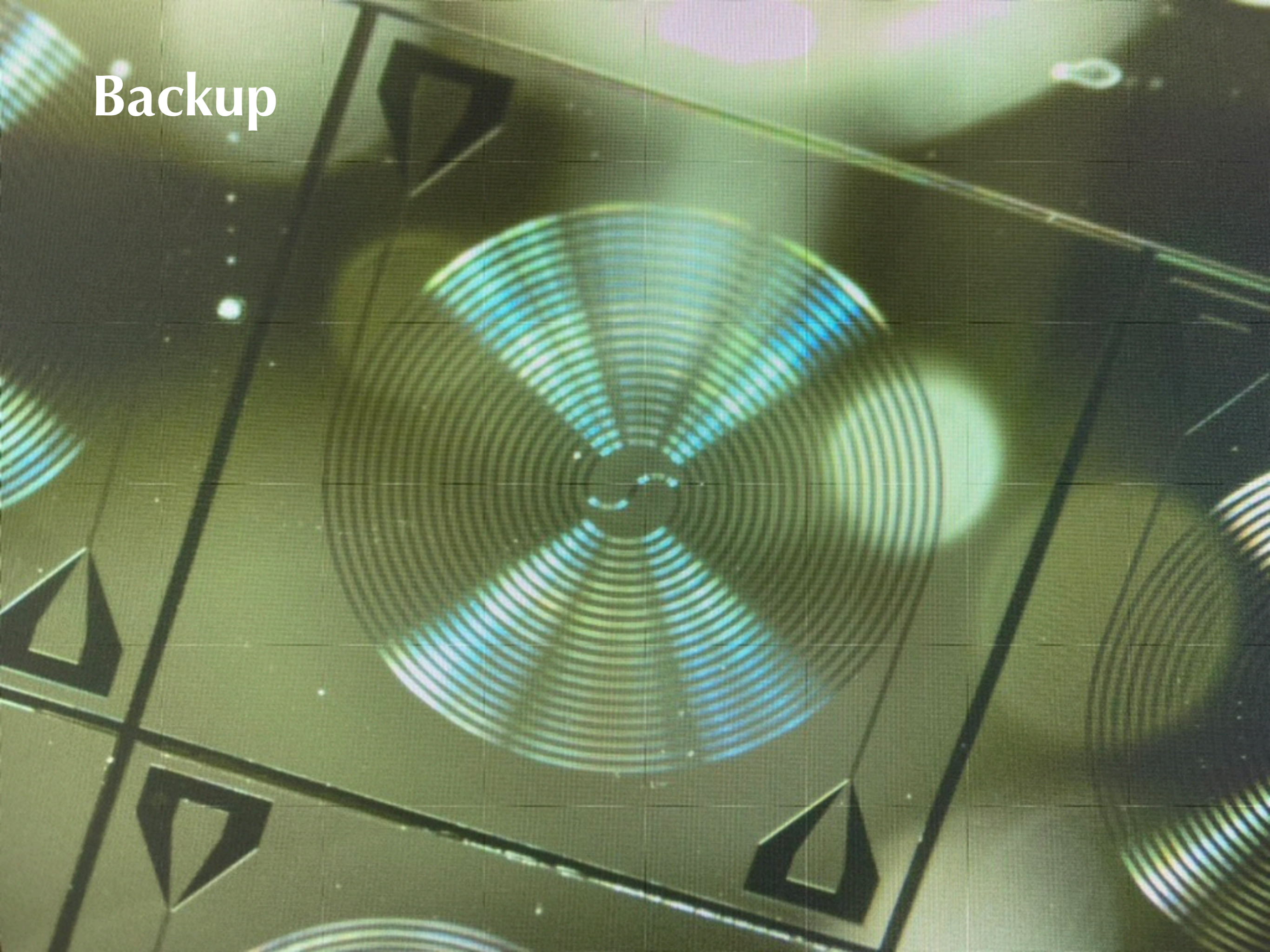
- "量子技術序論" 長田有登, 山崎歴舟, 野口篤史
- "The Physics of the Dark Photon: A Primer" M. Fabbrichesi et al.
- "Quantum Computation and Quantum Information" A. M. Nielsen & I. Chuang

ミーティング: 毎週 火曜 13:00-14:00 [議事録](#)

- [まとめgoogle doc](#): 参考文献とか
- Slack: [#quantum](#)

5月からクリーンルームの装置講習などを始めるので、
興味ある方は陳 (308) まで。

Backup

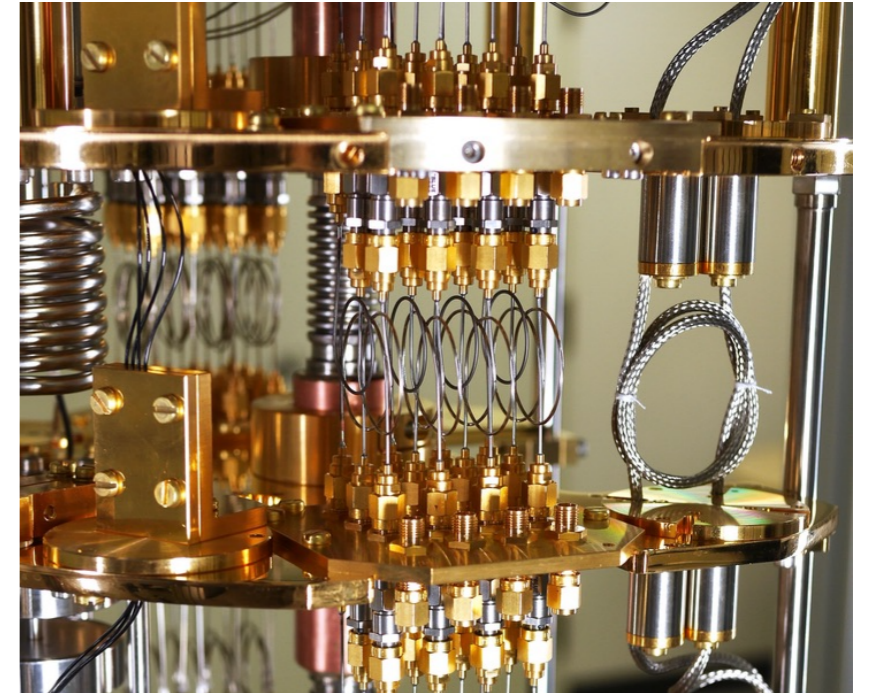
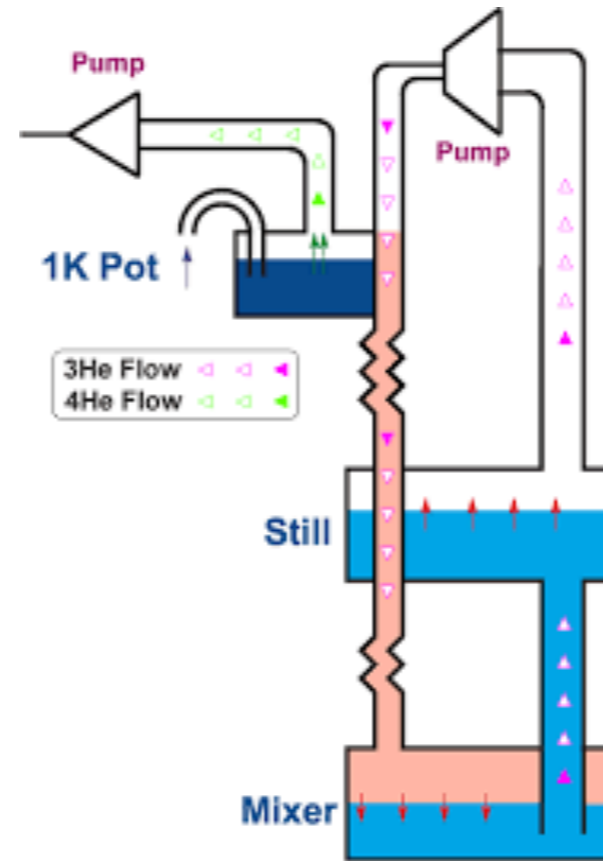
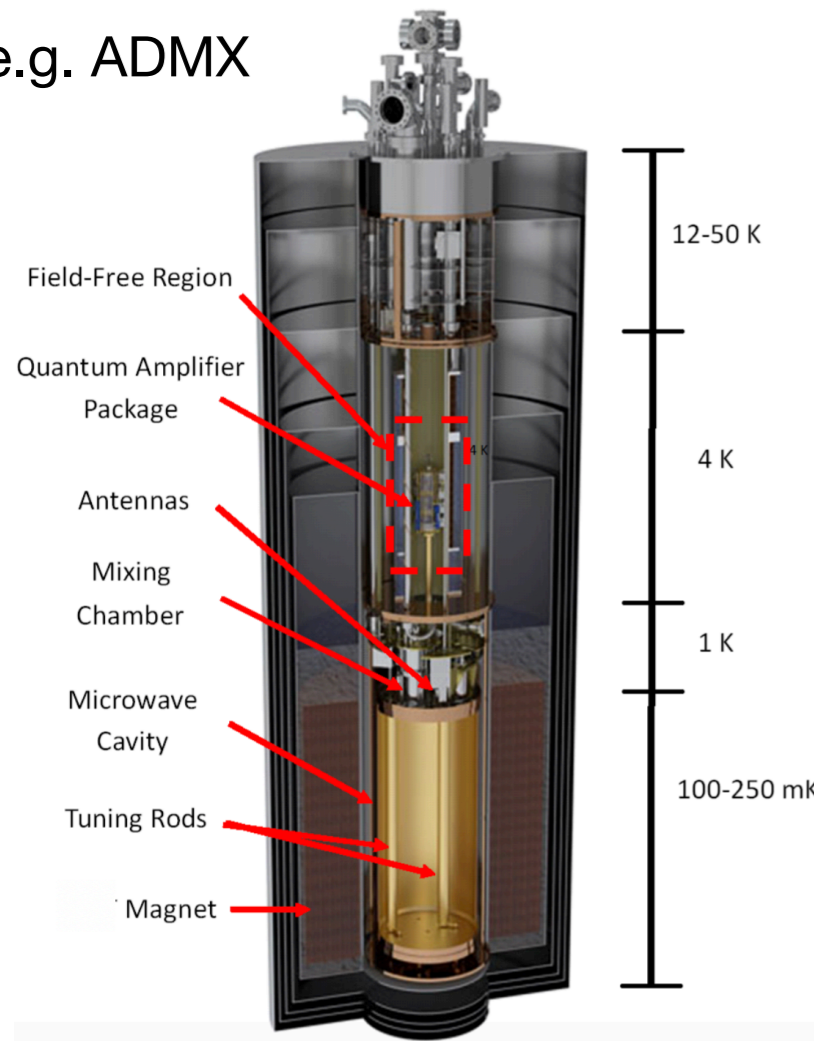


Cryostat

Dilution refrigerator:

Coldest available large-volume fridge (~10mK)

e.g. ADMX



He³ soaks into He⁴
→ evaporation heat ❄️

Heat sources ("big-3"):

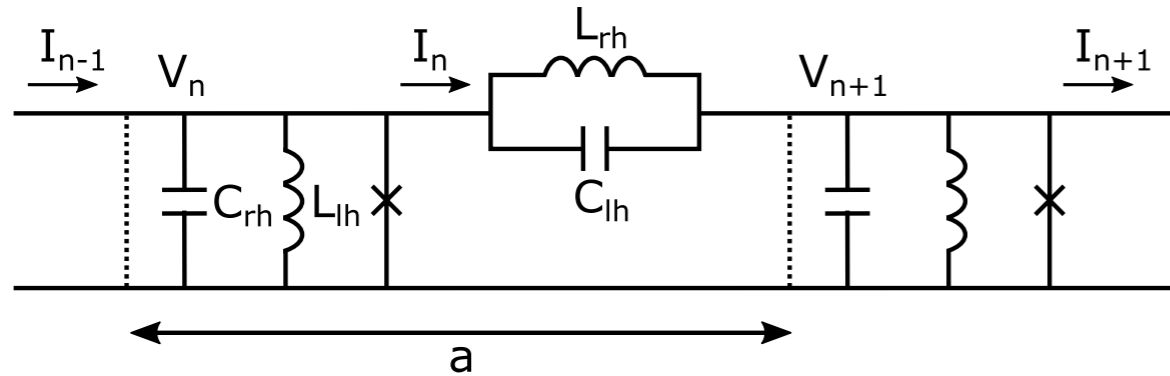
- Conduction (via pipes/cables) → make them long, low conducting materials
- Convection (via gases in the fridge) → high vacuum
- Radiation (from outside) → metal shielding

<< Cooling power: 100-1000μW

Takes 2-10 days to reach the lowest temperature

ブラックホールの量子シミュレーション

[Katayama \(2021\)](#)



ホーキング放射:

一般相対論の量子的な考察から予想される放射。
弱すぎて観測不能 ($\sim nK$)。どうやって理論を検証する??

量子シミュレーション:

似たようなHamiltonianを実現する系を作って測定
測定結果 = 元の系における計算結果

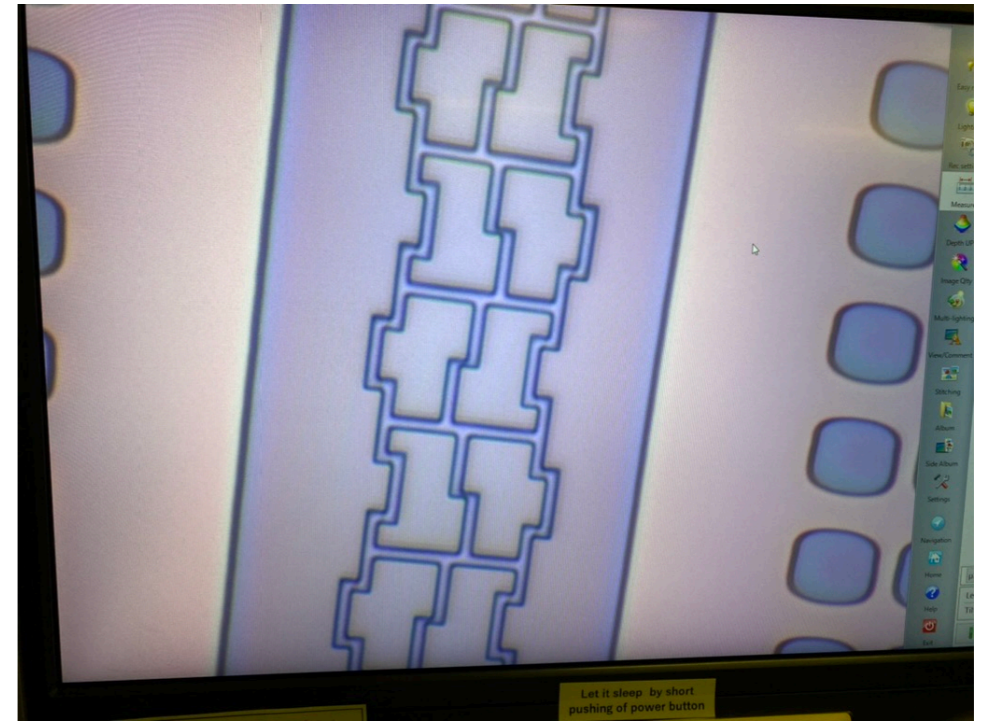
ジョセフソン接合: 非線形 (光波混合起きる)

ブラックホールのような歪んだ軽量が入った
系を形式的に再現できることが知られている

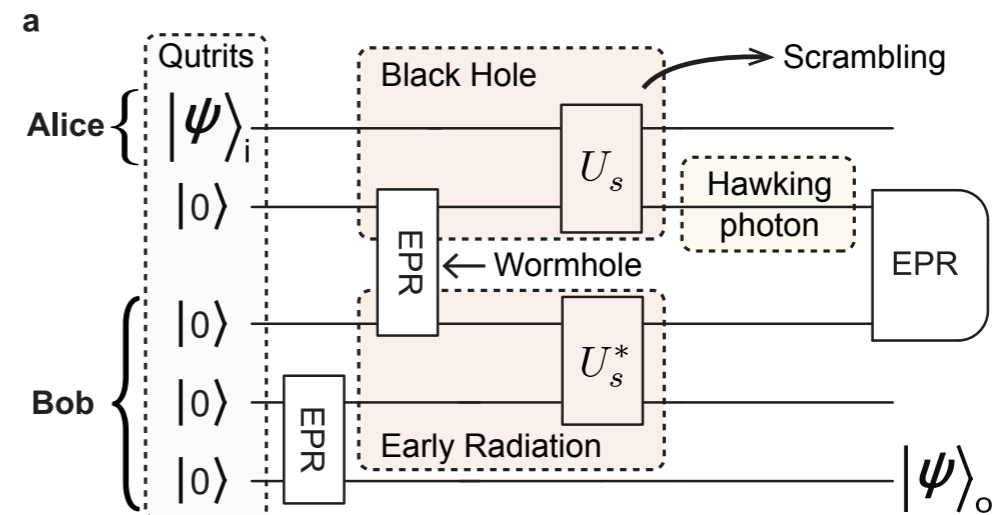
実測/計算できないものを回路の測定から知る

Hawking放射, Horizonの内側 etc.
非自明な理論のinternal consistencyの検証

試作したジョセフソン接合型導線



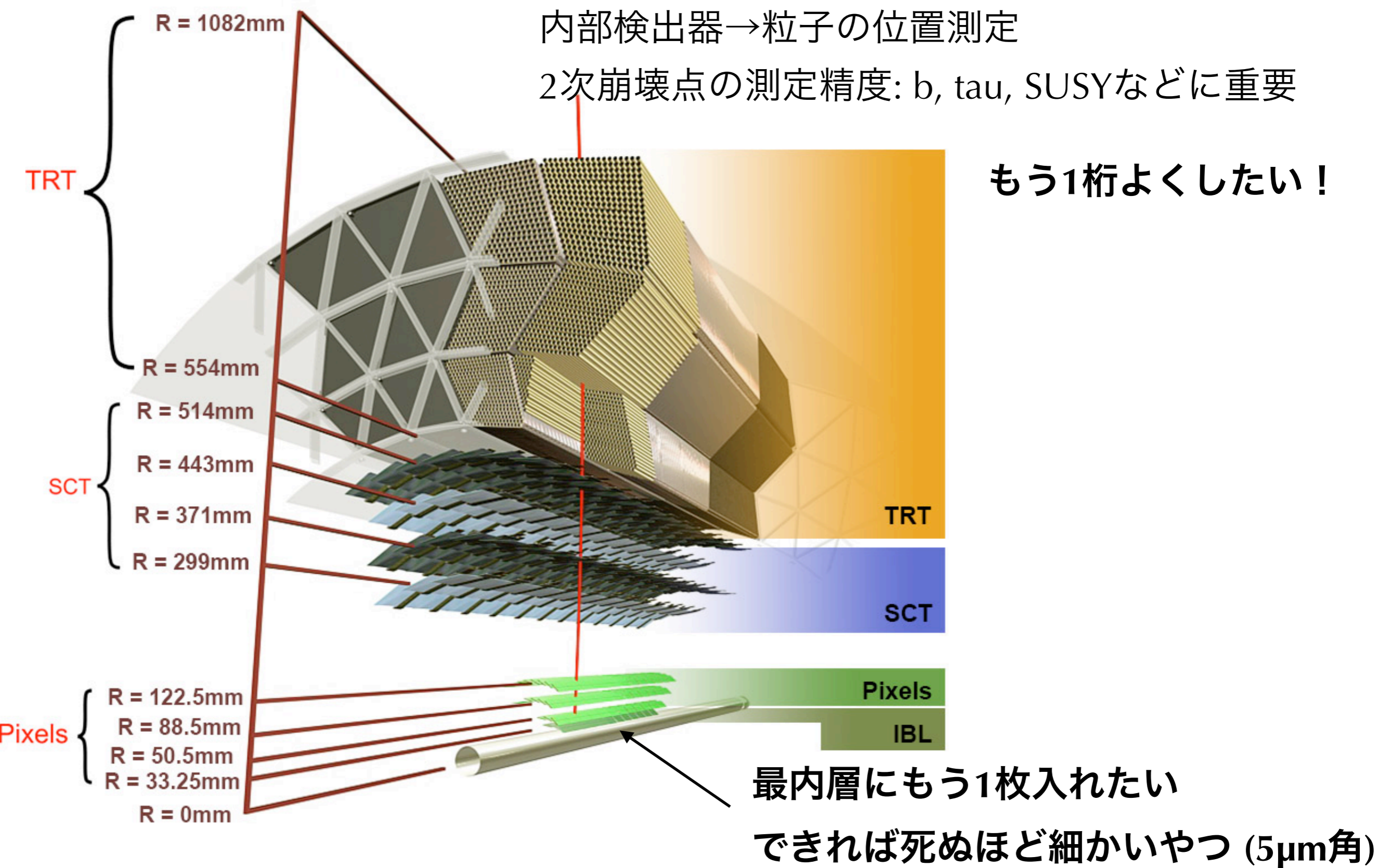
量子ビットを使ったデジタルシミュレーションは
Google et al.が2022年に発表



アナログ系の実験はまだやられていない

[Blok et al. \(2021\)](#)

高温超伝導体でコライダー実験用のpixel検出器



高温超伝導体でSNSPD

SNSPD: 超伝導ナノワイヤー検出器

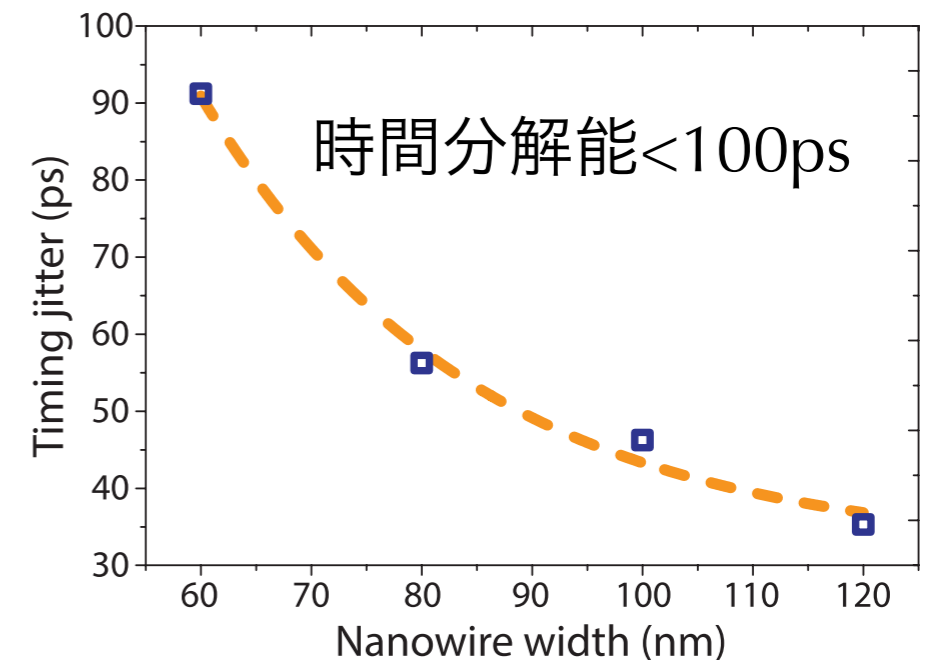
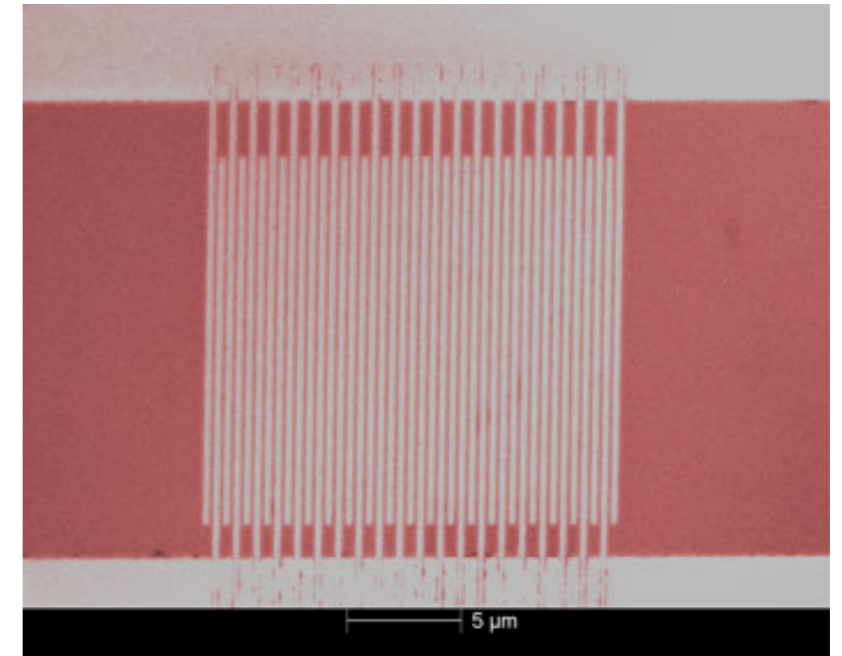
- 粒子が中でエネルギー落とすとクーパー対破壊
ワイヤーの導通が常伝導化→信号
- ワイヤー間隔 ~ 位置分解能 (原理的には $\sim 1\mu\text{m}$?)
- 高周波で読み出し多重化も容易

コライダーの実験環境は厳しいが

- 高放射線ダメージ → 薄膜だから大丈夫?
- 熱 → 高温超伝導体 (すでに実装例はある)
- 高レート (25nsおき) → SNSPD: O(100ps) 分解能
- 強磁場耐性? - これは一番ネックになりそう

目標

- 数nsで立ち上がるSNSPDを複数pixelで作って1本のbus lineで読み出す
- ゆくゆくは1000チャンネルくらいを25nsおきに読み出せるようにする。
- 究極的な目標としては2040年くらいにATLASのビームパイプに巻く



量子高周波デバイスの開発

e.g. 普通のサーキュレータ

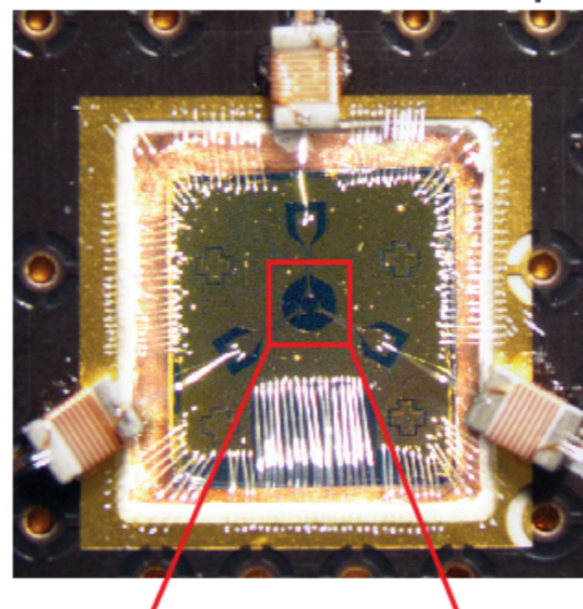


3cmくらい

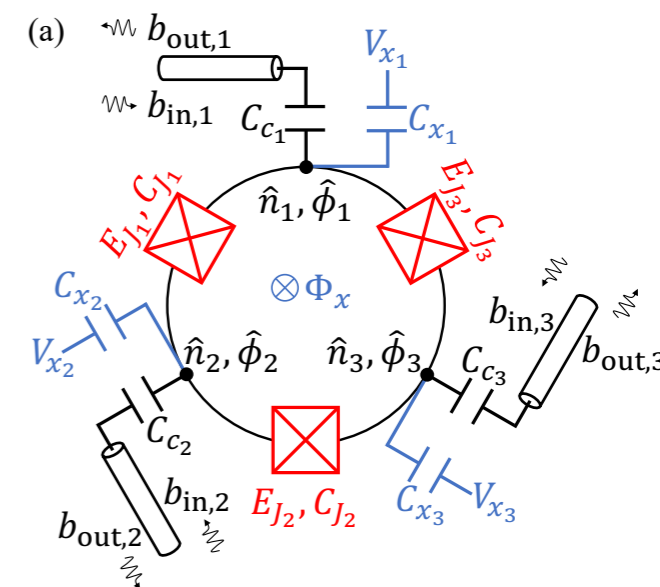
ジョセフソン接合で作ったサーキュレーター

[Mahoney et al. \(2017\)](#)

1 mm



[D. T. Le et al. \(2021\)](#)



高周波回路素子は結構デカイ

10万qubitの量子コンピューター作るみたいな話になるとかなりきつい

→ チップに埋め込んで小型化

(どうせ冷えるので) Josephson接合が使える → 強い非線形効果

一つのチップ + input/output line 2本だけで全部済ませるデザインが究極的な野望

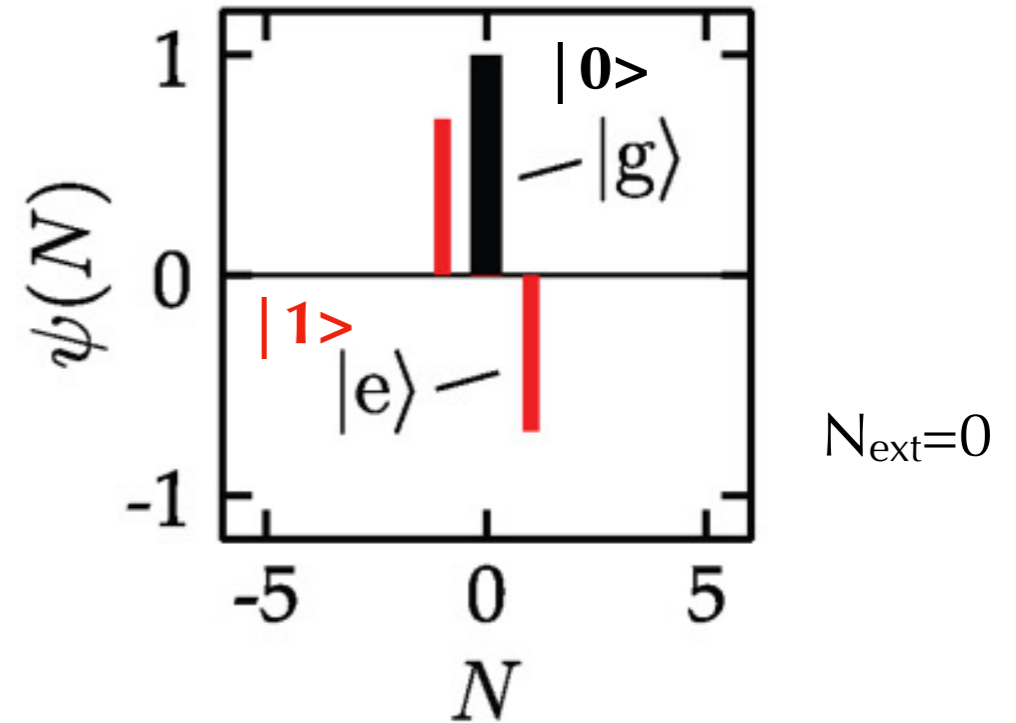
$|0\rangle$ と $|1\rangle$ の物理的な状態

$E_J/E_C = 0.1$ ("Cooper pair box")

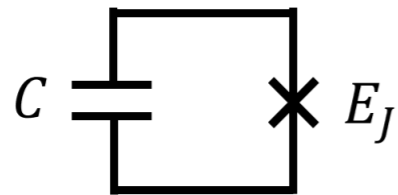
$$\hat{\mathcal{H}}_q = 4E_C(\hat{N} - N_{\text{ext}})^2 - E_J \cos \hat{\varphi}.$$

capacitance pad
にいるクーパ対の数

外部電荷バイアス
(charge noiseも含む)

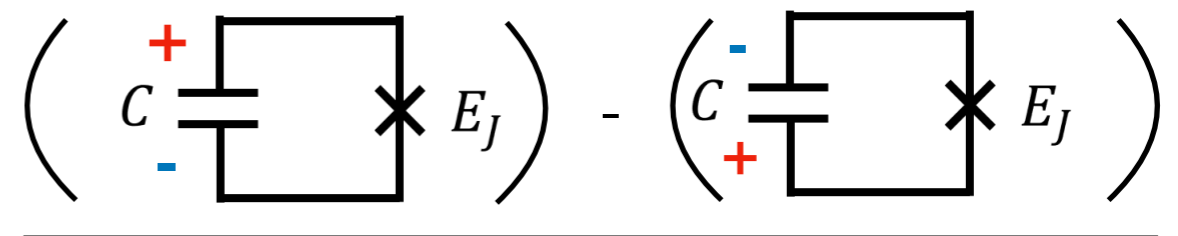


基底状態: $|0\rangle$



クーパ対 (平均的には) どこにも
溜まってない状態

第一励起状態: $|1\rangle$



$\sqrt{2}$

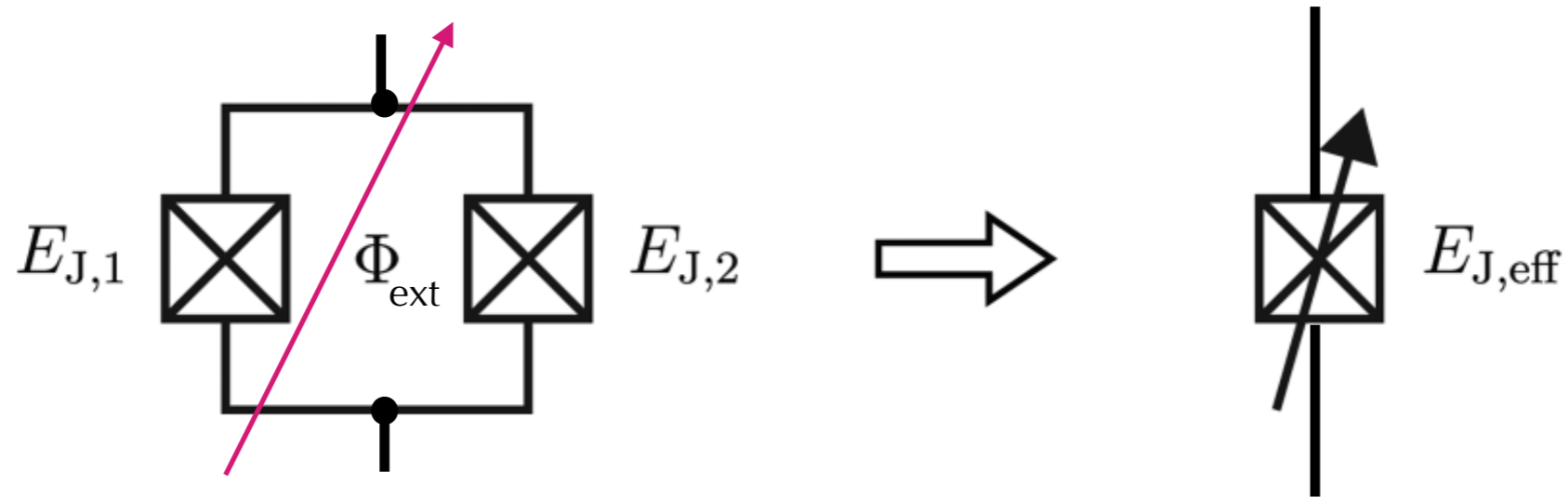
クーパ対**1対**の振動 → 電気ノイズに超敏感

電気ノイズ耐性を確保するため $E_J \gg E_C$ でやることが多い ("トランズモン")。

大きなcapacitance padを作ることに相当。

SQUIDにすると変調ができる

Jの並列ループ = Superconducting QUantum Interference Device (SQUID)

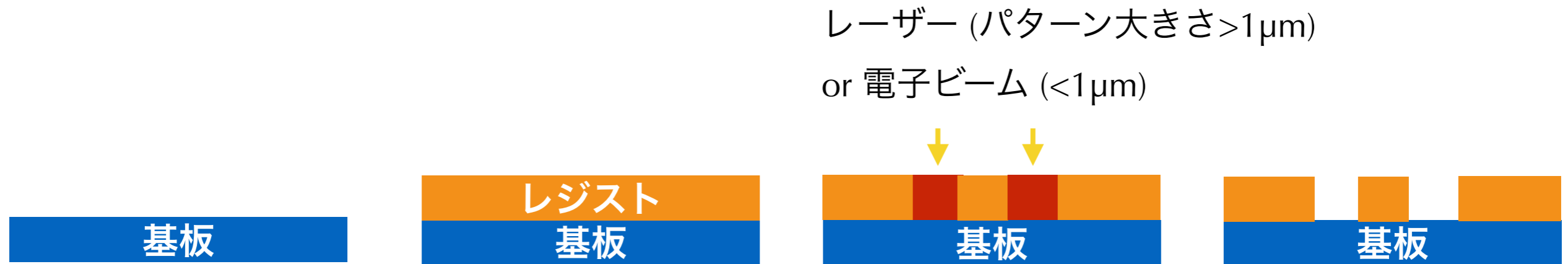


$$E_{J,\text{eff}}(\varphi_{\text{ext}}) = \sqrt{E_{J,1}^2 + E_{J,2}^2 + 2E_{J,1}E_{J,2} \cos \varphi_{\text{ext}}}$$

SQUIDループを貫く磁束で E_J が調節できる → 量子ビットの周波数が変えられる

“人工原子”

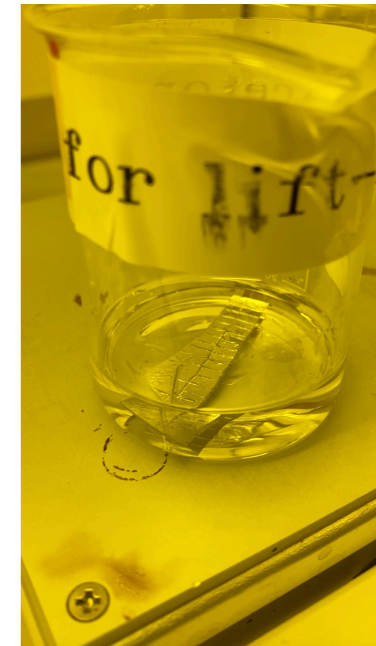
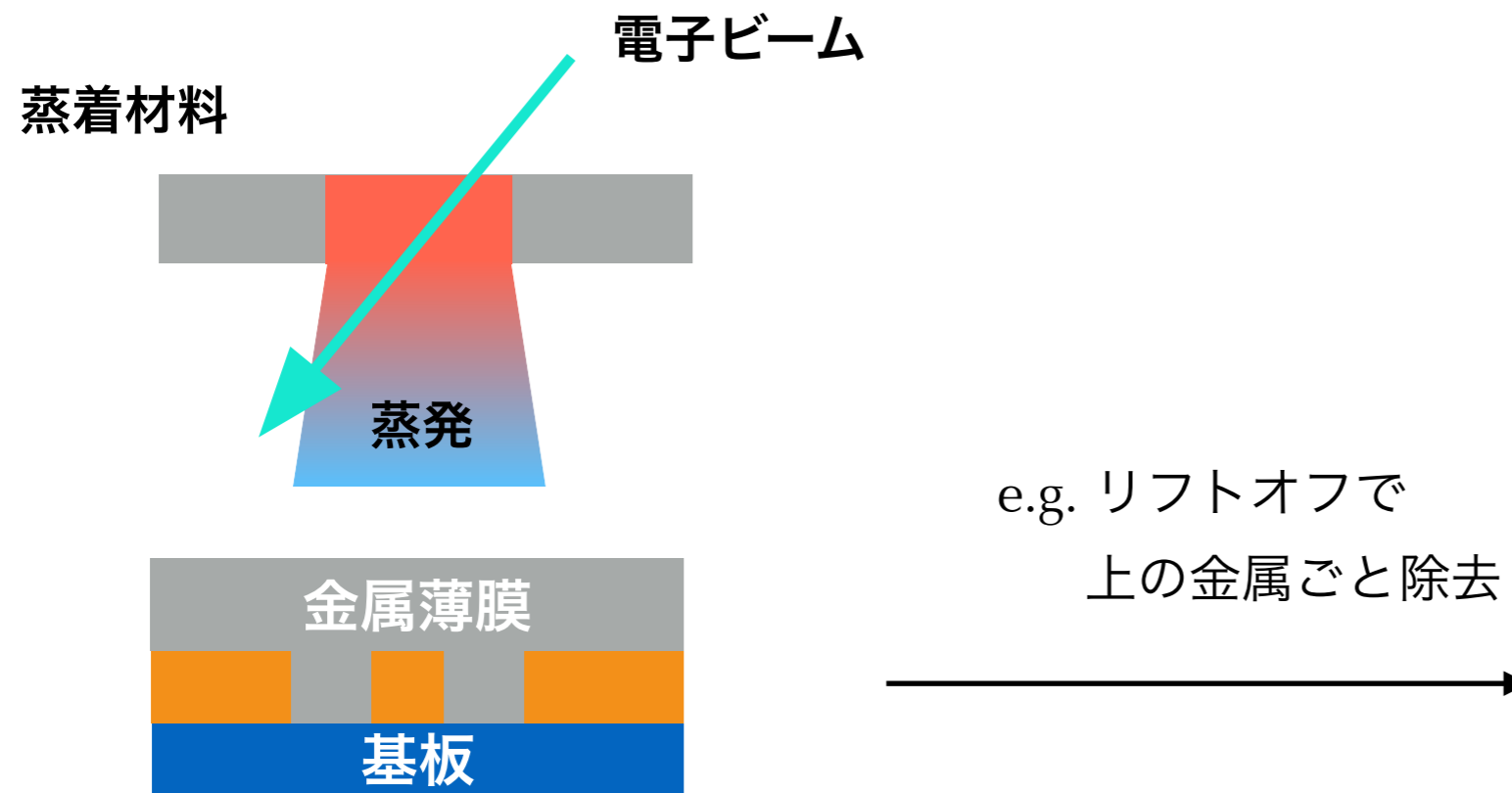
パターンを彫る (リソグラフィ)



- 基板はシリコンかサファイヤの単結晶。小さい誘導損失。
- レジスト (表面を保護する有機物の層) を塗る。
- レーザーか電子線ビームを露光。
- 感光したところは現像液で洗い流せる。

※ポジのレジストのとき。ネガだと感光してないところが現像で落ちる。

蒸着



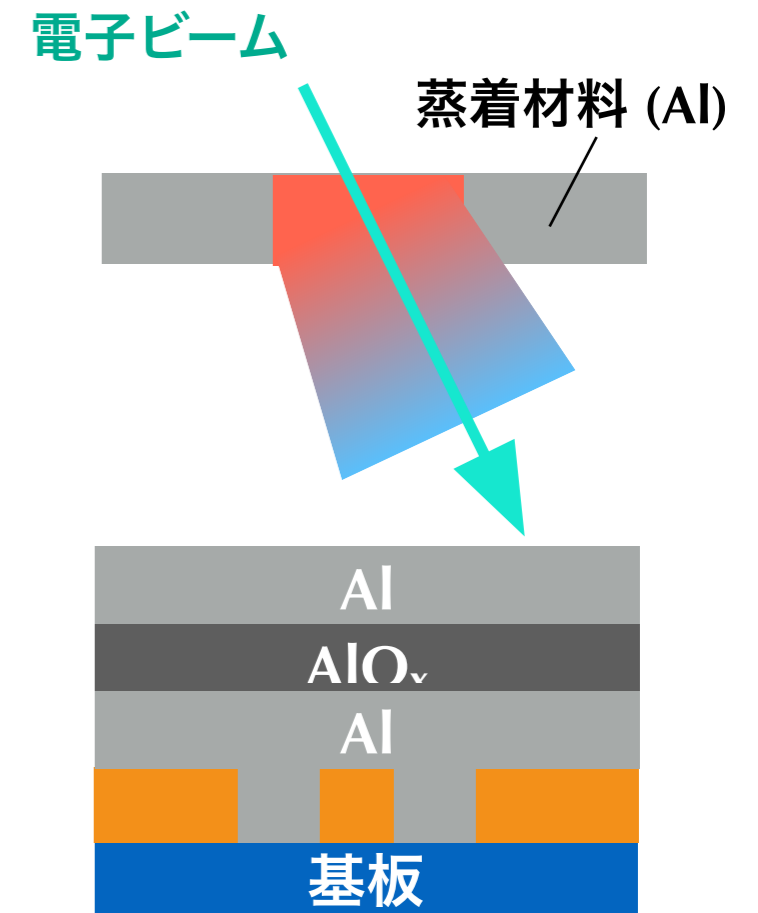
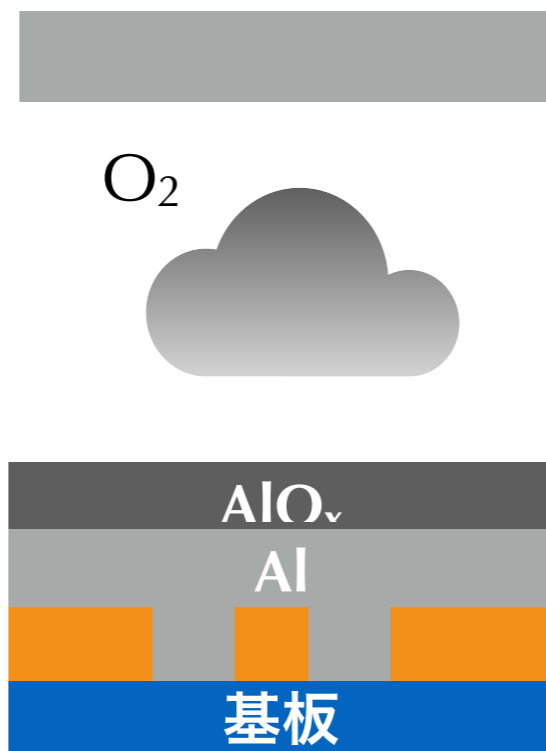
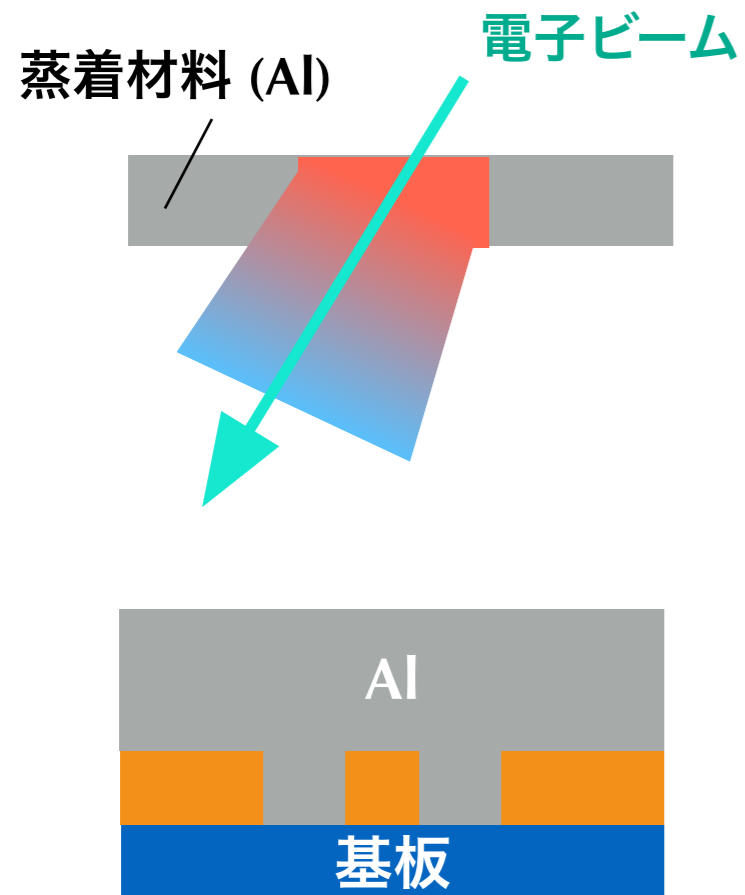
蒸発させた金属のガスに晒す → 薄膜できる

電子線蒸着だと指向性を持った蒸着が可能

最後に化学的にレジストを除去してパターンのみ残る

Josephson junctionの形成

Al-AlO_x-Alの場合



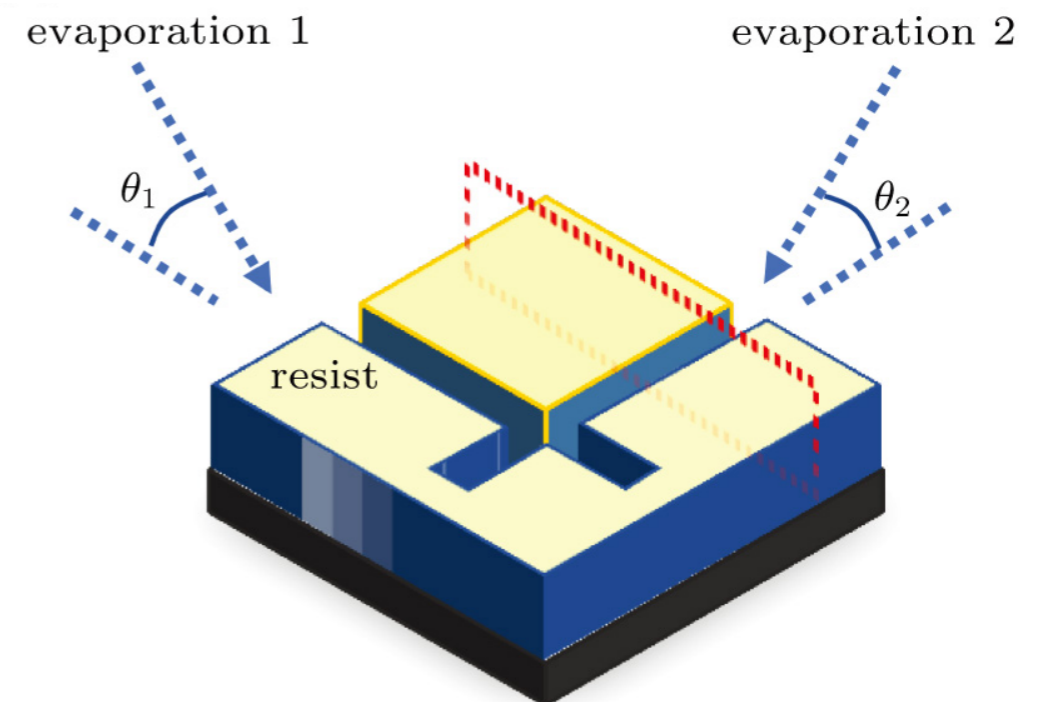
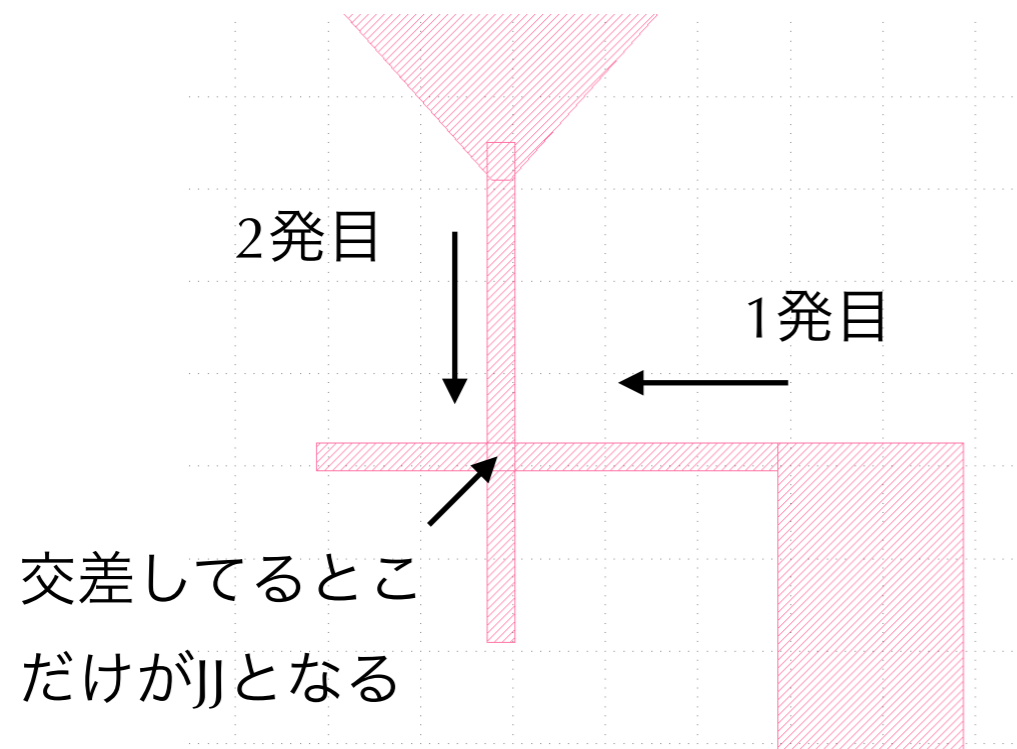
斜め蒸着

一斉に蒸着するとパターン全体がJJになってしまう。

大きすぎるとショートしやすいので $<1\mu\text{m}^2$ くらいの面積に収めたい。

→ 電子ビームを用いて指向性蒸着を複数回やる

e.g. Manhattan法

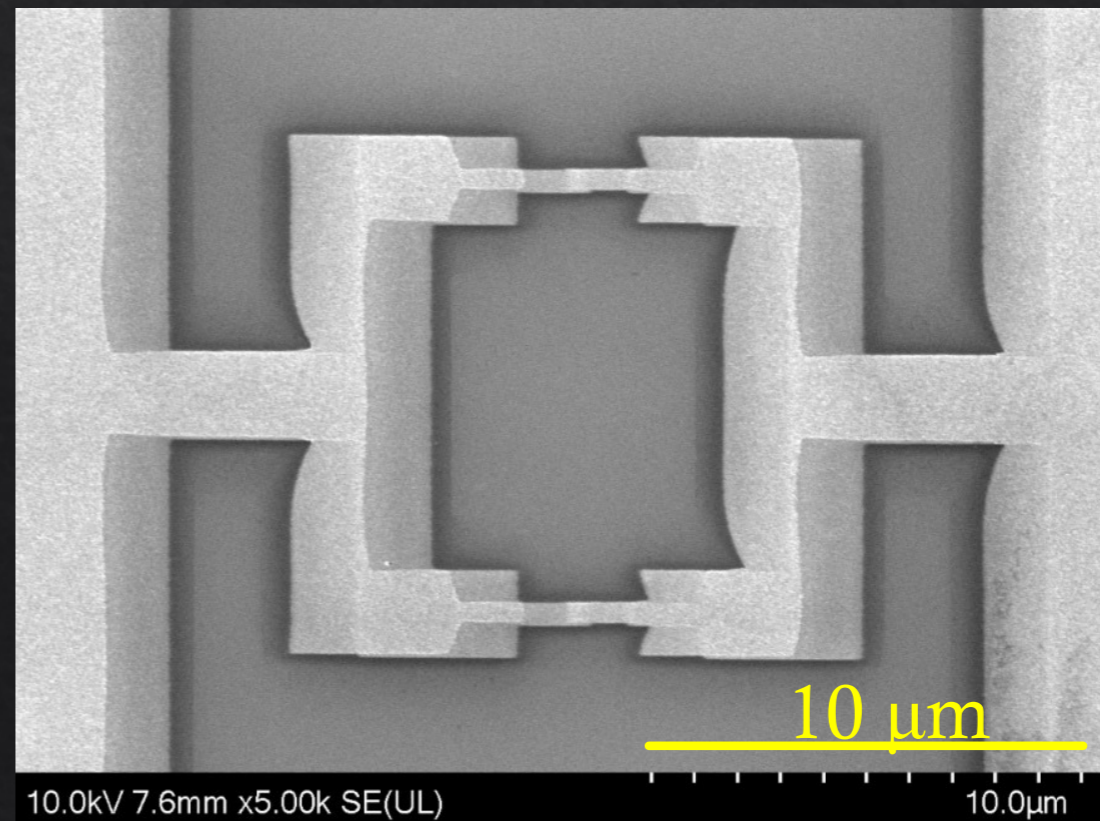
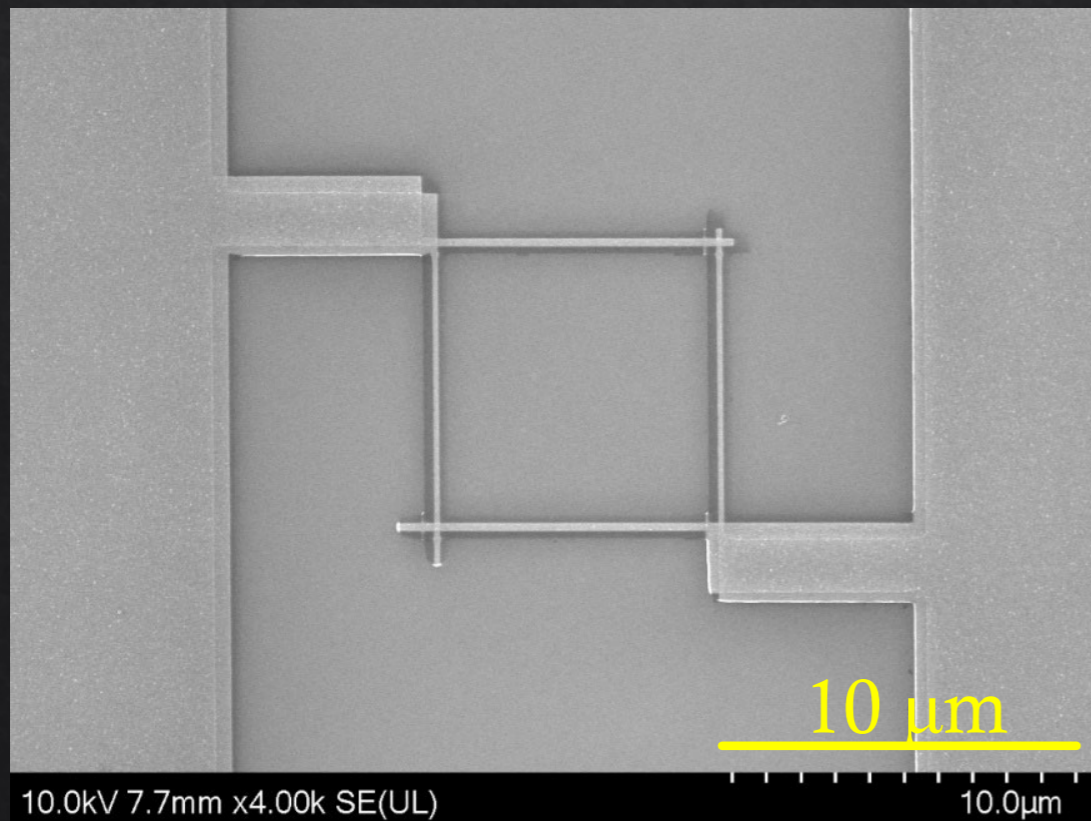
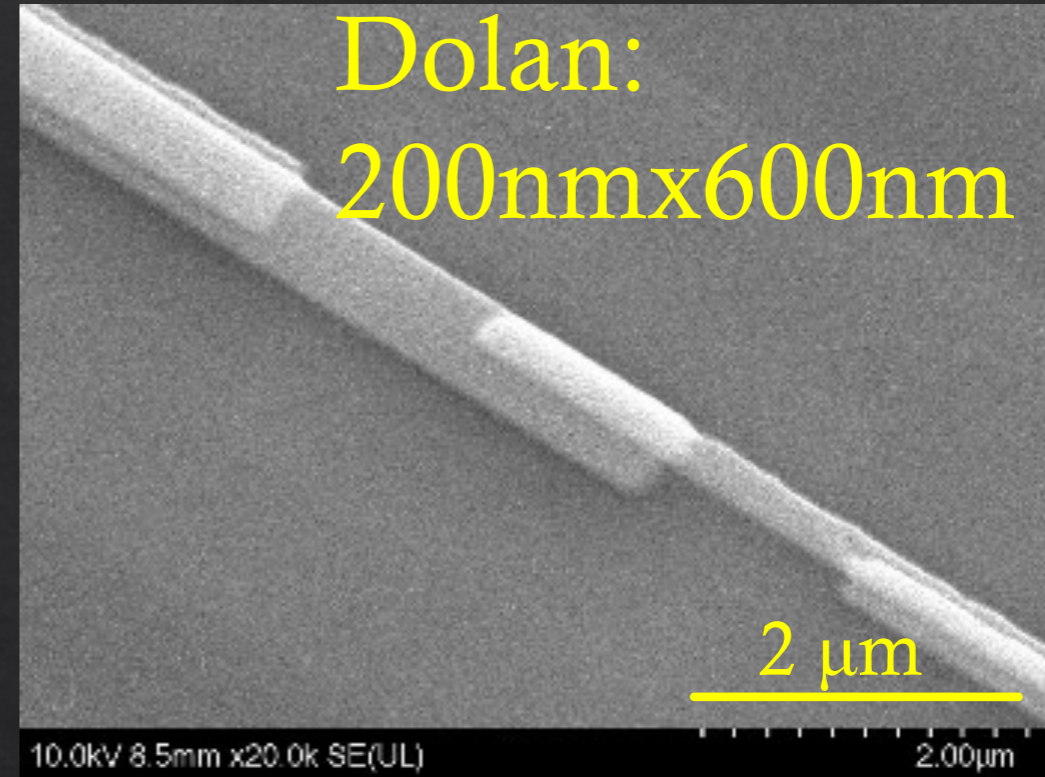
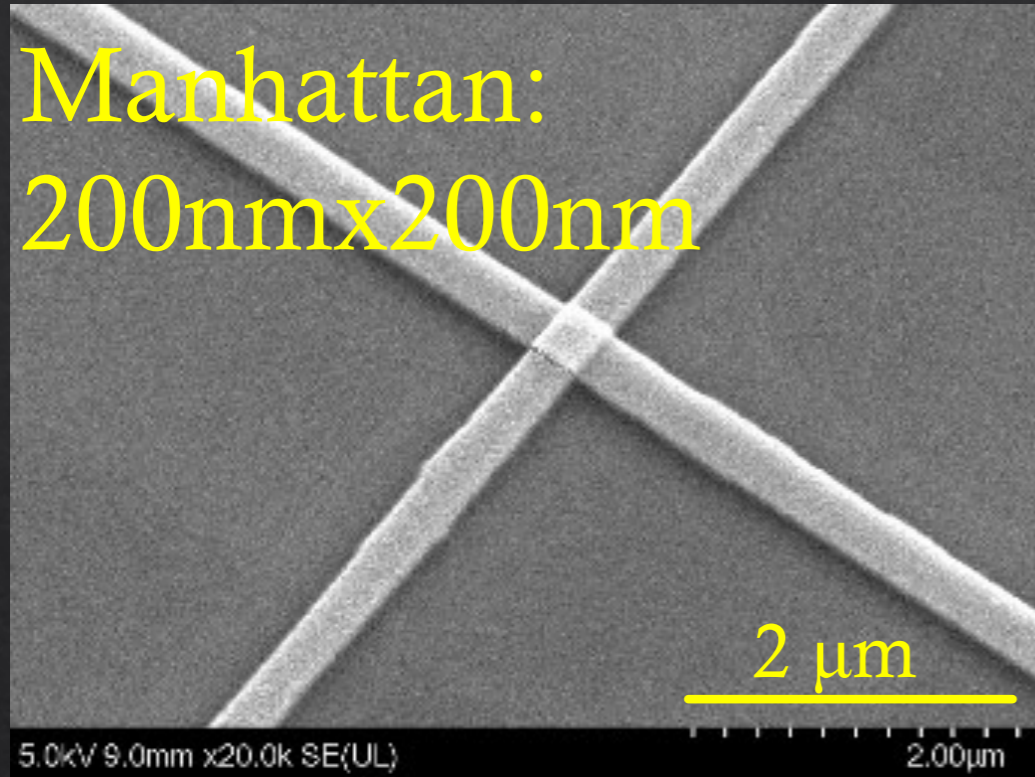


レジストの壁が影とならない
場所のみ蒸着される

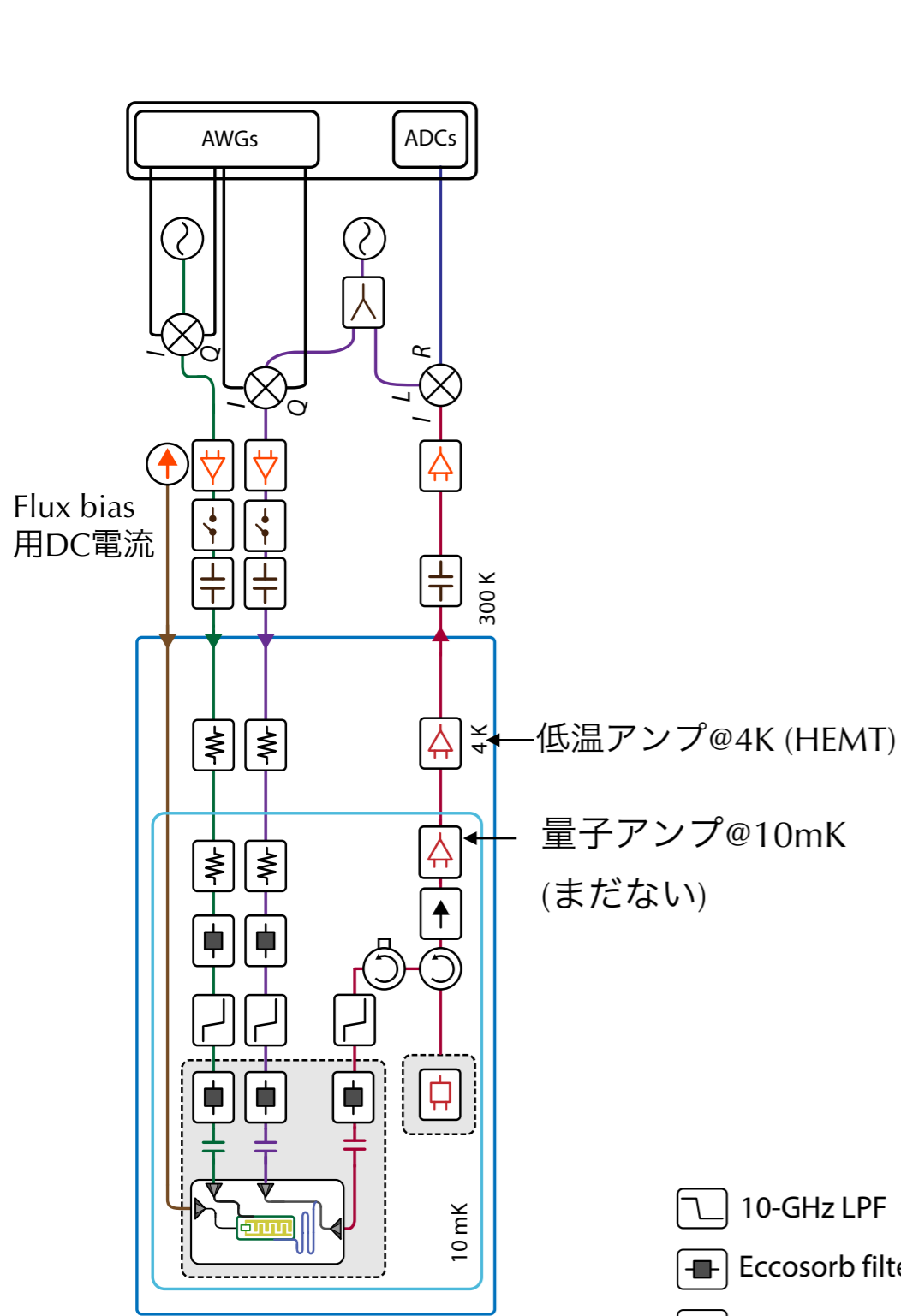
Junction fabrication









(top: JJ, bottom: SQUID)

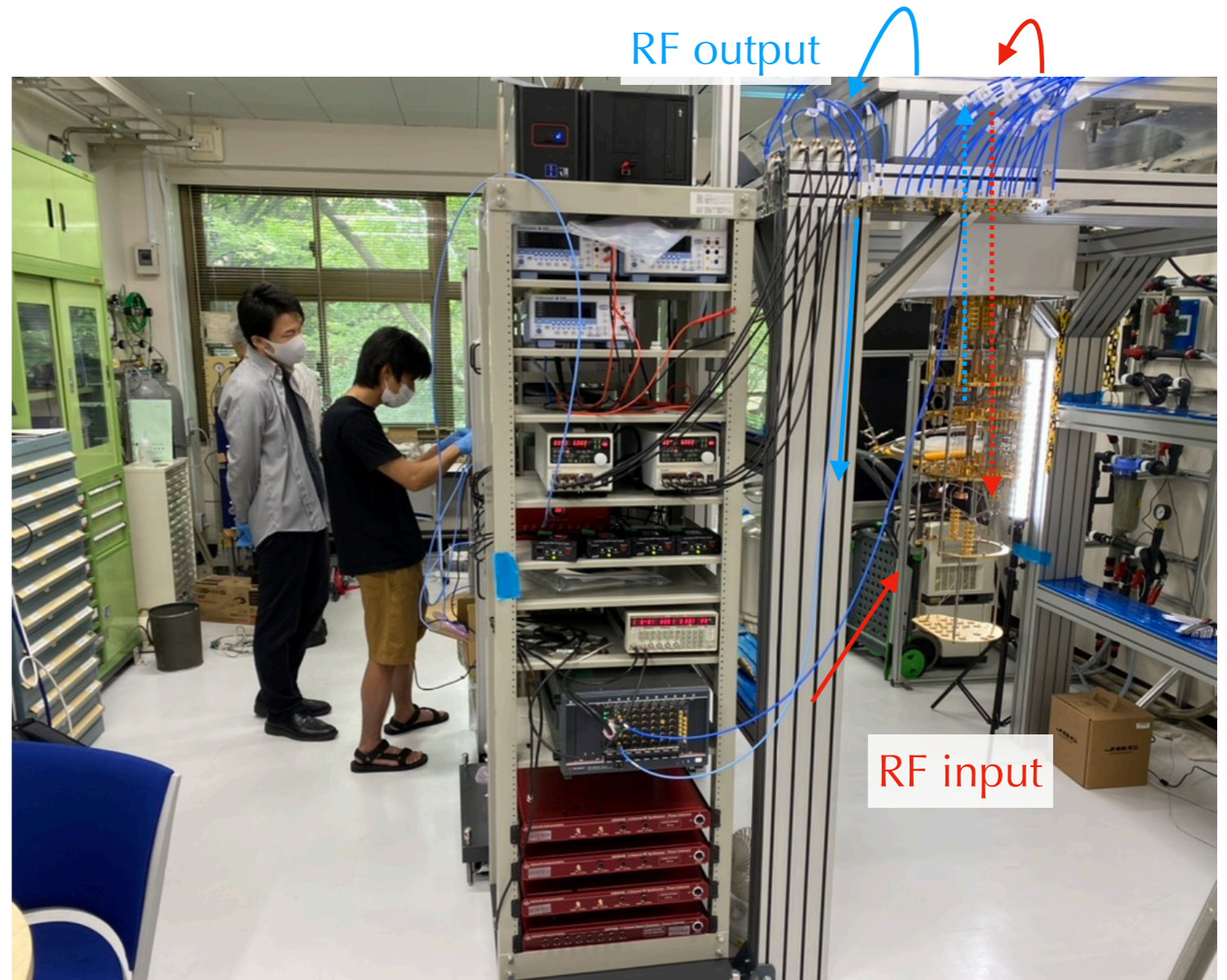
SEM images



RF測定系



-  10-GHz LPF
-  Circulator
-  20-dB attenuator
-  Eccosorb filter
-  Isolator
-  Cryoperm shield
-  Quantum-limited amplifier
-  Amplifer



ミキサ



減衰器

