超伝導量子ビットを使った量子センサー

陳詩遠

2025.4.22 Micro workshop on Quantum detection of (dark) waves @京都大学

今日話すこと

○ 超伝導量子ビットとは

○ センサーとしての応用

○ ダークマター探索への応用

超伝導量子ビット = キンキンに冷えた非線形LC回路



○ 超伝導 → 散逸なし

○ キンキン (<100mK) → 熱ノイズ << 電荷1粒溜まったコンデンサーのエネルギー

→ 量子化された回路のエネルギーが見える

○ ジョセフソン接合の非線形性で非調和に

→ 個別のエネルギー差にアクセス

<mark>典型的なqubit周波数: 1-10GHz</mark> マイクロ波領域



実際は電気ノイズ耐性を確保するため $E_J > > E_C$ でやることが多い ("transmon") 大きなcapacitance padを作ることに相当



シリコン or サファイヤ基板上にアルミの薄膜を蒸着



Josephson接合×2 = SQUID → 変調ができる



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

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





2D実装: DC電流→磁束



3D実装: コイル巻くだけ





集積性が高い \mathcal{FIG} . 1. Ultra-coherent multiple superconducting transmon colored optical micrograph of a superconducting device, consisting of fe 量子コンピュ re叙houttivesonをtors (green) coupled to a shared Purcell filter (red). (b) H Al/AlO_x/Al Josephson junction (blue) shunted by a Nb capacitor (yelle of the device. (d) Simplified cryogenic wiring. (e),(f) Time traces of the

冷やす

希釈冷凍機の最も冷えてる場所 (~10mK) に吊るす





制御・読み出しはマイクロ波 (RF) の照射で行う

量子ビットの状態操作 |0> ⇄ |1>



g: coupling constant $\sim \mu \cdot E$ (µ: qubit electric dipole moment)





共振器を通じて読み出す

共振器の中に量子ビット置く → 共振モードの電場と結合

量子ビットの状態に応じて共振周波数が変わる







Q [mV]

コヒーレンス時間 (量子ビットの寿命)

縦緩和 (T1): |e>→|g>脱励起 光子のロスとほぼ同義

自然放出、クーパー対壊れる ("準粒子生成") 素材内のより散逸の激しい2準位系 (TLS) との結合

横緩和 (T₂*): |e>と|g>の係数の相対位相がランダム化

エネルギー準位のブレと同義

Charge/fluxノイズ, cavity内の残留光子, 準粒子生成など

Müller et al. (2019)













チップ内の共振モード (2D実装)

コヒーレンス時間 (量子ビットの寿命)





Breaking through the millisecond barrier with our single junction transmon @IBMResearch

ツイートを翻訳



午後8:57 · 2021年5月20日

20年で6桁改善

ノイズに強いデザイン

e.g. トランズモン → T₂大幅改善

測定環境のノイズ低減

シールド, 低ロスパッケージング ノイズフィルター, Purcellフィルター

素材研究

アモルファス少ない: Nb, Ta 酸化特性よい: TiN, Ta, NbN, AlN 界面きれい: エピ成長TiN 洗浄プロセスの洗練

強結合と寿命を両立できる ようになってきた

...

センサー応用



超伝導量子ビットセンサーの特徴

光子との強結合原子の×O(10⁶) ○ 高感度な光 (マイクロ波) のセンサーになる ○ 結合自体はまだ大きくできる

高い周波数調節能力 1粒で2桁いける

• 0.2-20 GHz

○本質的に共振器 (高感度) でありながら広帯域

コヒーレンスはそんなに良くない
 特に自作する場合

○ 凝った量子測定は現状そこまでご利益ない (微妙なfidelity → dark count爆裂)
 e.g. 多ビットのエンタングルメント

○ 逆にいうとここが改善されるとできることが爆上げ
 Google/IBMの量子コンピューターはその水準に近づきつつある

EDM: $\mu \sim Qd$

$$d = O(0.1 \text{mm})$$

macroscopic

JJ 🛛

単一マイクロ波検出器として使う



Cavity内にいる光子数によってqubit周波数が変わる (ac Stark shift)

大体n個photonいたらnxズレる (x: dispersive coupling ~ O(MHz))

○ Qubit周波数の変化を検出 (測定) できれば光子の存在を主張できる

例:非常に弱い共振器光子の検出 <u>A. Dixit et al. (2020)</u>



できました 📴 時間はかかるが (~O(1ms))

効率: 40% / Dark count rate (DCR): 10-4



SQL

10⁻¹

誘導放射: n-fock状態で信号n倍 <u>A. Agrawal et al. (2023)</u>

Dark photonがcavityで光子に転換 = (量子光学では) cavity状態のdisplacement $a \rightarrow \gamma$ 始状態がn=10だと転換率10倍 $10\gamma + a \rightarrow 11\gamma$ 11個のうち誰が変換したやつなのかわからん→干渉



さらにfancyな状態準備で増幅



Squeezed state

CAT state



光子の検出 → 光状態の変化の検出

さらに fancy な 状態 準備 で 増幅

GKP stateを使った coherence wave estimation

J. Gardner et al., 2404.13867



c.f. 量子コンピューターでエラー訂正しきれいない謎のノイズがあるらしい



Quantum error correction using surface code



○ 10-6-10-8 くらいで起こるエラーは宇宙線のせいであることがわかった

→ Gap engineeringで保護することに成功

○残留エラー率:~10-10 "burst"みたいなものが~400µsくらい続いている

○新物理?

コヒーレンスの悪さを逆に使う



Quantum capacitance detector

○ Charge noiseに著しく弱いqubit parameter (E_C/E_J<1: 20年前のqubit) であえて作る

- 粒子が基板と相互作用 → Cooper pairを破壊 (Bogoliubov準粒子を生成)
 破壊された人が JJ を通過するとエネルギー準位の構造が変わる→検出
- 準粒子10個以上壊れた状態 (~THz photon) を信号とみなすとDCR~Hzくらい

ハイブリッド系 → 他の素励起にアクセス



<u>O'Connel et al. (2010)</u>

target: マグノンモードの励起

Spin-transmon target: 単一スピン励起



<u>Z. Wang et al. (2023)</u> <u>久保さんのセミナー</u>より

結合gがあると励起が周期T~1/gで入れ替わる



素粒子実験への応用

素粒子実験への応用

希釈冷凍機による制約:シールドの遮蔽・熱源NG・巨大化厳しい

向いてる応用:

○ 光に弱く結合する場の検出 (貫通→冷凍機の中で光に転換)

- 波状ダークマター (axion, dark photon)
- 高周波重力波 (MHz-GHz)
- Dark radiation etc.

○ ニュートリノ? アイデアはないがセットアップ自体は理想的

向いてない応用:

○ 大アクセプタンス or 大容量必要

e.g. 低レートの粒子, コライダーで4πで囲う etc. ○ 熱が発生するもの e.g. コライダーの前方検出器



素粒子実験への応用

希釈冷凍機による制約:シールドの遮蔽・熱源NG・巨大化厳しい

向いてる応用:

○ 光に弱く結合する場の検出 (貫通→冷凍機の中で光に転換)

- 波状ダークマター (axion, dark photon)
- 高周波重力波 (MHz-GHz)
- Dark radiation etc.
- ニュートリノ? アイデアはないがセットアップ自体は理想的

Dark photon・Axion DM探索への応用

1. 既存のhaloscope実験の改善

2. 新しい量子ビットベースの実験を始める (今日はこっちだけ)





৾ঀ৾৾ঀ৾৾ঀ৾৾৾ঀ৾৾

 $\cos^2\beta$

25

時間分解能もあるのでtransientなものでもOK

DarQ experiment "Dark matter search using Qubits"

UTokyo/ICEPP



新田さん



来春からICEPP

KyotoU HE group



諸井さん 福田さん UTokyo Noguchi Lab

Riken +

野口さん



白井さん

۱N



News Instuments R&D Users (schedule) Contact QCRC Millikelvin Quantum Platform Shared use equipments that support and accelerate research and development of quantum technology Millikelvin Quantum Platform ON ON C News June 14, 2024Usage charges of our equipment have been revised at th 16th Steering Committee meeting of CRC (applicable from June 1, 2024).



稲田さん



中川さん

タナポーンさん





澤田さん

昨秋 京大+東大+理研の新実験立ち上がる

量子ビットの直接励起

DMから転換した光子由来のコヒーレントな電場



○ そもそもqubit-photon結合は強い µqubit ~10⁶ × µatom

直接励起はnaiveには筋が良いはず

ダークマター由来の光: コヒーレント
 Qubitにとってのドライブパルスになる
 Rabi振動: 1Hz-1kHz
 振動の立ち上がりを頑張って捉える

Chen, Fukuda, Inada, Moroi, Nitta, Thanaporn PRL 131, 211001 (2023)

Qubitのドライブパルス





Time lapse after resetting the qubit [0.1 µs]

0.01%-10%



量子ビットはプロにもらう

測定だけやる

量子ビットから自作

全部やる

自由度

既存の量子コンピューターを使う

ダークマター検出器になっていただく

楽

量子ビットはプロにもらう

測定だけやる

全部やる

自由度

既存の量子コンピューターを使う

ダークマター検出器になっていただく

楽

超伝導量子ビットの作り方

Qı	Jar	ntum	mee	tinç

Yuya Mino

ICEPPでの製作例

- 基板 FZシリコンウエハ (110表面) + HF処理 (水素終端)
- レジスト 上層: <u>ZEP520A</u> (500nm, 現像: ZED-N50 1min) 下層: <u>PMGI-SF6</u> (500nm, 現像: NMD-W 14-20sec)
- フォトリソ Heidelberg DWL66+ @東大武田CR
- エッチング Samco 10NR CF4 process @東大武田CR
- 電子線リソ ADVANTEST F7000-VD02 @東大武田CR
- 斜め蒸着 Plassys MEB550S @OIST 電子線蒸着 Al: 45/70nm (上層/下層) 酸素導入: 0.3Torr 10min

リフトオフ NMP 80℃

ウエハHF処理

蒸着終了直後のサンプル

Plassys MEB550S @OIST

○ 16時間で2000 step 12MHzをカバー

○ SQUID変調コイルの電流で発熱して200mK近くなった影響でdark count ~10%

○対策して~30mKほどに。次回広帯域測定の予定。

量子コンピューターの文脈から外れた量子ビットはアツい

量子コンピューターにとって論外な状況が我々的には嬉しいときが結構ある

特にコヒーレンス (寿命) の制約を外すことで全く違ったデザインが有望となる可能性あり

 強結合: 一般的にコヒーレンス悪いがセンサーとしては最大のポテンシャル

 高周波 (>20GHz): 重いダークマターに感度を。熱励起にもより強い。

 他にも強磁場耐性 (Axionなど) や偏光感度? (CMBなど) へ向けたのニーズ・アイデアある

Axion探索に向けて どう強磁場をかける?

一般的に磁場と超伝導は相性が悪い。Qubitでもしかり。

 $\frac{e}{c}\partial_{\mu}a$ (교磁素 $\frac{1}{2}$) ($\frac{1}{2}$) ($\frac{1}{2}e^{-\frac{1}{2}}\partial_{\mu}a$ ($\frac{1}{2}e^{-\frac$

 $g_{aee} = \frac{g_{aee}}{f_a}$ の面直磁場は論外。= s_3^{s} bulkっぽい面内磁場でも30mTくらいが限界だと言われてた。

厳密な面内磁場だけかけると1Tくらいまで耐えるという噂も

 $= \sum_{N=p,n} \circ \frac{C_{P}}{2f_{a}}$ $\sum_{N=p,n} 2f_{a}$ $\sum_{N=p,n} 2f_{a}$ $\sum_{N=p,n} 2f_{a}$ $\sum_{N=p,n} 2f_{a}$ $\sum_{N=p,n} 2f_{a}$

量子ビットはプロにもらう

測定だけやる

量子ビットから自作

全部やる

自由度

既存の量子コンピューターを使う

ダークマター検出器になっていただく

楽

量子コンピューター = ダークマター検出器?

e.g. IBM-Q 使えるマシンのリスト

Q Search by system or simulator name						Your systems & simulators (26) \checkmark			
Name	Qubits \downarrow	QV	CLOPS	Status	Total pendir	ng jobs	Processor type		
ibm_seattle Exploratory	433	-	-	• Online	0		Osprey r1		
ibm_washington	127	64	850	• Online	4		Eagle r1		
ibm_sherbrooke	127	32	904	• Online	104		Eagle r3		
ibm_brisbane	127	-	-	• Online	512		Eagle r3		
ibm_nazca	127	-	-	• Online	10		Eagle r3		
ibm_algiers	27	128	2.2K	• Online	58		Falcon r5.11		
ibmq_kolkata	27	128	2К	• Online	40		Falcon r5.11		
ibmq_mumbai	27	128	1.8K	• Online	472		Falcon r5.10		
ibm_kawasaki	27	128	-	• Online	120		Falcon r5.11		
ibm_cairo	27	64	2.4K	• Online - Queue paused	673		Falcon r5.11		
Items per page: 10 $ \lor $ 1-10 of 26 items						1 ~ of 3	pages (

それぞれのbitのT1, T2, エラー率 etc.が表示できる

- 😃 高性能のビットいっぱいある
- ●動作がある程度保証されてる 定期的に較正・ダメqubitは回避可能
- 😃 制御・読み出しが既にほぼ最適

- 😔 周波数固定
- 😔 磁場かけられない
 - ダークフォトン専用機
- 😔 Qubitパラメータがわからない
 - 発見専門マシン・limitは書けない

やってみた

as of 16th Sep 2024

127
Qubits
3.2%
EPLG
29K
CLOPS

Status:	• Online
QPU region:	us-east
Total pending jobs:	1222 jobs
Processor type 🛈:	Eagle r3
Version:	2.1.37
Basis gates:	ECR, ID, RZ, SX, X
Your instance usage:	157 jobs

Median ECR error:	7.134e-3
Median SX error:	2.449e-4
Median readout error:	1.130e-2
Median T1:	197.19 us
Median T2:	140.62 us

127-bit Eagle processor

こんな感じのスクリプトを投げるだけ

Script-based dark matter search

UIもよくできていてジョブ管理も快適

Jobs

	ID / Name	Status	Created \downarrow	,	Completed	Usage	Туре	Compute resour	ce 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		:
	cvhttmt8w2g0008e	⊘ Completed	13 Sep 2024		13 Sep 2024	1m 9s	sampler	ibm_kawasaki		•
Item	s per page: 10 🗸 1-8 o	of 8 items							1 ∨ of1pages	•

5min queue, 1min run time (n_{shots}=10⁵)

G 🗗

結果

○ 公称の読み出しエラー率より基本的に高い励起率を観測

パッケージによる信号遮蔽

金属の箱はみなcavityである

- 共振しない光が入ってきたら壁がキャンセル電流流して消そうとする
- 幸いダークマターの場合は質量があるおかげで、壁から離れるとキャンセルが完璧ではなくなる
- $\circ L_{\text{shield}} >> \lambda_{\text{Compton}}$ であれば大丈夫 → シールドは十分大きい必要がある
- ○ところがチップはノイズを最大限遮蔽するために普通ギリギリのパッケージング
 典型的に信号は1/100とかになってしまう

DM-induced

ダークマター探索で究極感度を出すにはこの方向しかない?

量子測定のポテンシャルをフルに活かすなら完璧なマシンが必要

- T₁/T₂ > ms, gate fidelity>99.9%, エラー訂正実装
- 超伝導を諦めるという手もあるが、周波数桁で変えたかったら現状他に手はない
- 自前で検出器を作るのは完璧な量子コンピューターを作るのとほぼ同じ
 - → 企業のコンピューターに乗っかるしかない

だが、企業はチップの蓋を外してくれない

○ アクシオンやりたかったらさらに強磁場をブチカマす必要もある

○ 企業に協力してもらってDM探索専用機にカスタムというのが感度的には最も有望?

Transient signalの検出に向けて

高周波重力波・dark radiation:弱い場の「風」 一時的にかしか来ない
○ 共鳴を使ってのんびり周波数スキャンする実験は基本何も見えない

○ 「怪しい周波数が見つかってから追試」もできない

考えたいこと

○ Off-resonantで全部の周波数に感度を持つような検出技術はないか

○ それか超高速で周波数スキャンできるようにする?

○ High-Qでwidebandな共振器? e.g. TWPAの3D実装?

c.f. 3D JPA https://arxiv.org/pdf/2205.13101

○ 複数の検出器置いて同期

量子状態として同期取れないか? $A \propto \langle \psi_{det1} | \psi_{det2} \rangle$

最後に: われわれは何がやりたいのか

ダークマター/重力波もよいが、

弱い場のセンシングで他に血が沸き立つようなベンチマークはあるか

○ 宇宙背景ニュートリノ (300個/cm³, β~10⁻⁴)

○ 重力 (の量子効果)

テンションが上がるものは多ければ多いほどいい。

王道の素粒子実験に使うという方針はありえるか?

○ 高温超伝導体で量子ビット/SNSPD → µm角のpixel検出器

○ フォノンカウンティングの利用

重たいWIMPの原子核反跳, 0vββ

Backup

2012 2017 C 757 Zaff

0 4 16 12 FIF 3 2 111 Z- Z a

大規模HEP量子実験

First donated 9 T, warm bore MRI magnet ~\$7M to be moved to Fermilab this year for ADMX-EFR.

<u>FNAL-SQMSを中心</u>に構想がある

"Quantum Garage" @SQMS

大規模HEP量子実験 (Longer time-scale)

<u>"Colossus"</u> @FNAL

HL-LHC後のCMS磁石を拝借する プランが言及され始めている

arxiv: 2209.12024

✓直径3.4m, 高さ3.7m, 300-500µW 通常の×10の体積 / ×15の冷却能力

Vision: use a quantum computer as the front-end electronics for HEP experiments

connected to quantum

B field

computer outside of the

- 1. Single photon frequency transduction (quantum networking tech)
- 2. Signal processing pipeline (made of qubits and cavity qRAMs)
- 3. Analog signal integration (using qubits as quantum memory banks)
- 4. Noiseless readout (already factor 1/100 of zero-point noise)
- 5. Deployment of non-Gaussian resources to speed up time

Quantum computer safely outside the MRI room

n-Fock stateで増幅

A. Agrawal et al. arXiv: 2305.03700

誘導放射でDM→光の転換率上げる

Cavity haloscope RF読み出し回路

Cavity haloscope RF読み出し回路

フォノンで壊されたCooper対を増幅

宇宙線・放射線由来のノイズから量子ビット を守るフォノントラップを応用

フォノンがHe³を蒸発→捕縛してスピン検出

"Quantum evaporation"

Lyon et al. (2023)

"Quantum Sensors for High Energy Physics" <u>arxiv: 2311.01930</u>

		Liaht	Lorentz対称 Dark radiati	 ···					
	axion	WIMP	Axion domain wall				Counter P, CF		
	Dark waves	Dark particles	Cosmology, dark energy, phase transitions	Testing quantum mechanics	Quantum gravity	Telescopy	Collider, fixed target, high event rate	Symmetry violations	
SC qubits. SC cavities, SC continuous variables (JPAs, RQUs, KI-TWPAs, etc), squeezing, bae,transduction	x	x		x				x	
SC pairbreaking sensors (QCD, TES,MKID,SNSPD)	x	x	x		x	x	x		
Microcalorimetry, single phonon		x							
AMO, clocks, atom and photon interferometry	x	x	x	x	x	x		x	
NMR	x	x	x					x	
Optomechanics (squeezing, back-action evasion, etc)	x	x		x	x				
Quantum networks	x		x			x			
Sensor arrays, high channel count	x	x	x			x	x		
Quantum materials, metamaterials	x	x				x			
Foundry facilities	x	x	x	x			x	x	

飛んでる光子も検出できる

Inomata et al. (2018), Lescanne et al. (2019)

May et al. (2025), Pallegoix et al. (2025)

○ Buffer resonatorに閉じ込めて時間を稼ぐ

○4光波混合で検出 Pumpと量子ビット周波数を調節することで掃印可能

$$\begin{split} \left(\alpha \left| 0 \right\rangle_{\mathrm{in}} + \beta \left| 1 \right\rangle_{\mathrm{in}} \right) \left| g \right\rangle \left| 0 \right\rangle_{\mathrm{out}} \\ \xrightarrow{4 \mathrm{WM}} \left| 0 \right\rangle_{\mathrm{in}} \left(\alpha \left| g \right\rangle \left| 0 \right\rangle_{\mathrm{out}} + \beta \left| e \right\rangle \left| 1 \right\rangle_{\mathrm{out}} \right) \end{split}$$

Efficiency ~ 50% Dark count rate ~ 0.1Hz

パターンを彫る (リソグラフィー)

- 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 (表面を蒸着やエッチングから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が現像で落ちる。

蒸発させた金属のガスに晒す → 薄膜できる

スパッタ: 全面につく, 電子線: 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

- リフトオフ: 剥離液でレジスト溶かし基板・レジスト界面を切り離す
- プラズマアッシング: 酸素プラズマ→O3ラジカルがレジストと反応・剥がす → 吸い出す

Josephson junctionの形成

AI-AIOx-AI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 (<1µm²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

○ 何もなければ (rotation frameで) 回転せず止まってる

○ なんかあると横回転する

- Qubit 周波数のドリフト e.g. 放置期間中にマイクロ波光子がやってくる → ac Stark shift
- 前段が完全にπ/2回転になってなかった e.g. ac Stark shiftのせいで打ったdriveが完全に共鳴してない
- ノイズによる位相ドリフト

etc.

64

Drive pulseを100MHz detuneしたときの測定結果

Driveのdetuneと同じ横角速度で横回転する ac Stark shift: *nχ* 横角速度を測定できればnが測定できる

High-Q cavityで高周波重力波

Berlin et al. (2023)

○ 2-cell cavity: 平行・反平行モードが緩く縮退 (~MHz)

○ 低い方のモードに光溜める → 重力波来たら高い方に励起 → ヘテロダイン検出

○ Mechanical 振動の励起と磁場転換の2つのチャネルがあるが前者がdominant

 ・振動励起はQ値が悪いため, off-resonanceでも有力な感度

○ GHz以上は量子ビットでsingle photon detection?

Opto-mechで量子的な振動励起をそのまま見る?

<u>O'Connel et al. (2010)</u>

- ○単一振動子励起はもう見えてる
 重力波による強制振動にも感度あるはず
- 軽いWIMPにも応用可能か
 軽すぎて原子核/電子反跳ではなく
 フォノンなどに緩和する → 振動子励起

量子ビットの温度?

 $|g\rangle
ightarrow |e\rangle
ightarrow |f\rangle$ (第二励起準位) のRabi振動の振幅比から求めた熱励起率

サンプルと冷凍機の温度は結構違う

残留熱励起が30-60mKくらいで飽和していることが長年知られている

宇宙線のせいだと信じられているが直接確認されたことはない

(電子温度が下げられないだけでは?というコメントも最近いただいた)

断熱消磁でsub-mKへ

残留熱励起の問題がどうにかできたら

冷凍機は原理的にはもっと冷やせる

○ 断熱消磁冷却: 1. 外部磁場で励磁 (エントロピー減)

2.磁場切る。断熱しながら緩和 (エントロピー増→温度減) → 1mK以下に

 励磁に時間がかかる (~30分) → 2つ用意してどっちか常に稼働
 ○希釈冷凍機の10mKステージにぶら下げる (希釈冷凍機で予冷する)

69

Limit引くのはかなり困難

 ○ ICEPPの量子ビットのパラメータを仮定
 ○ チップのシールドによる遮蔽効果を無視 (к=1) すると棄却領域は右の針たちみたいになる。
 将来展望: 2次の効果をしつこく測ることで chip paremeterをreverse engineering?

変調は意外とできる

 \circ Off-resonant \Rightarrow ac Stark shift

Adding one more CW tone at $\omega = \alpha_{drive}$ Rabi oscillation is driven by DM when $\omega_{DM} = \omega_q \pm \alpha_{drive'}$ $\langle X(t) \rangle = \cos\left(\frac{\alpha_{DM}}{2}t\right)$ $\langle Y(t) \rangle = \pm \sin\left(\frac{\alpha_{DM}}{2}t\right) \cos(\alpha_{drive}t \pm \phi_{DM})$ $\langle Z(t) \rangle = \pm \sin\left(\frac{\alpha_{DM}}{2}t\right) \sin(\alpha_{drive}t \pm \phi_{DM})$ ✓針を面に

Upper limit on the DM drive strength (in the unit of Rabi freq.)

