

■ 研究紹介

DarQ 実験はじまる

京都大学

陳 詩遠

chen.shion.2u@kyoto-u.ac.jp

KEK 量子場計測システム国際拠点

新田 龍海

tatsumi@post.kek.jp

2025 年 (令和 7 年) 11 月 18 日

1 あらまし

史記の李將軍列伝には「桃李不言，下自成蹊」という有名な一節がある。桃や李（すもも）は自己主張をしないにも関わらず、味がウマイので人間が勝手に集まってくる現象になぞらえた格言であるが、「やることやってれば結果は勝手についてくる」ことを端的に表現した古の教えである。これを拡張した諺として「あらゆる精密制御系はダークマター検出器である」というものもある。ノイズが少なく高感度な「良い装置」はダークマターといった弱い未知の信号を勝手に見つけてしまうということである。冗談のように聞こえるが、アンテナの雑音を減らす研究の中で偶然発見された宇宙背景放射などの例が物語るように、ある程度普遍性のある主張であると思う。

ところで、近年伸長が著しい超伝導量子コンピューターは、このような「良い装置」の新興勢力のひとつである。本稿で紹介する DarQ 実験 (Dark matter detection using Qubits) [1] は、この構成要素である超伝導量子ビットを用いて波状ダークマターの直接探索を展開し、量子技術の素粒子実験応用に正攻法で取り組むことを目指して立ち上がった実験である。

2 量子ビットはセンサーでもある

量子ビットとは、任意の量子的な 2 準位系によって構成される制御系である。光子の偏極、電子やイオンのスピン準位、LC 回路のエネルギー状態など、様々な物理的実体が候補となる。しかし実用に足る制御系としては：(1) 状態操作ができるくらいには外部環境との相互作用が強く、かつ (2) 量子状態が壊れないようにノイズが極限的に低いという、本質的にトレードオフの関係にある二つの要求を満たす必要がある。これの実現が困難であったために量子コンピューターは机上の空論とされてきたし、逆に近年これが克服されつつあるが故に世の中は色めき立ってきている。

奇しくもこの「外部との相互作用を強くしつつ、ノイズを抑えたい」というのは、一般的にセンサーに対する要求と同じである。相互作用を強くすることでより弱い外場に感度をもつことができ、またそれを検出できるためにはノイズに埋もれないようにする必要がある。つまり量子コンピューターの構成要素として有力な量子ビットは、そのままセンサーとしても有能である。またエネルギー閾値が非常に低いというのも量子ビットセンサーの際立った特徴の一つである。量子状態の位相制御性の要請から、量子ビットは典型的に meV 以下のエネルギー差の 2 準位系を使うことが多いが、これはシリコンやシンチレーターなどの標準的な検出器テクノロジー、また TES/mKID/SNSPD といった超伝導検出器に比べても桁で低い (図 1)。この低閾値によって量子ビットを用いた単一フォノン [2]、単一マグノン [3]、単一マイクロ波光子 [4]、単一スピン [5] の検出が報告されている。通常このような低閾値になるとノイズの影響が大きいいため検出は非常に困難であるが、ノイズ抑制技術の長足の進化によってそれが可能となってきた。

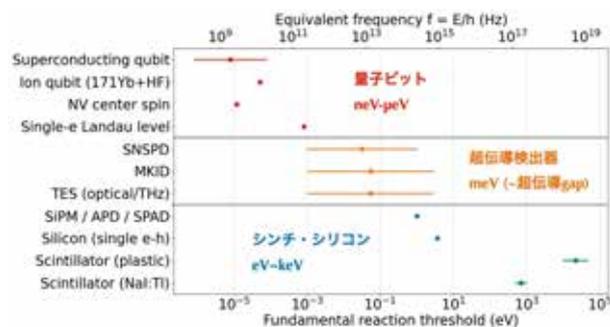


図 1: 検出器テクノロジーの典型的な検出閾値。

3 超伝導量子ビット

数ある量子コンピューターの方式の中でも超伝導方式は現在最も有力である。その基本要素である超伝導量子

ビットについて簡単に解説する。詳細なレビューとしては [6] などを参照されたい。

超伝導量子ビットは、非線形なインダクタを持つ LC 共振回路である。大きさは典型的に 0.1-0.5 mm 前後で、シリコンやサファイアの基板の上に微細加工した超伝導金属薄膜のキャパシタンスパッドと、その間に形成されたジョセフソン接合からなる。図 2(a,b) にその概観と等価回路を示す。この系のエネルギー基底状態 ($|g\rangle$) と第一励起状態 ($|e\rangle$) をそれぞれ 0 と 1 とみなして使う。 $|g\rangle$ と $|e\rangle$ のエネルギー差 (量子ビット周波数: E_{ge}) は典型的にマイクロ波領域 (数 GHz) なので、熱励起を抑えるため E_{ge}/k_B より桁で低い 100 mK 以下の極低温が要求される。量子ビット周波数 E_{ge} は回路のキャパシタンスとインダクタンスから決まるが、単一接合の代わりにジョセフソン接合を並列に並べた素子 (SQUID) を用いると、このインダクタンスの値が SQUID のループを貫く磁束 (φ_{ext}) によって制御できる。例えばそれぞれのジョセフソン接合のインダクタンスエネルギーを $E_{J,1}, E_{J,2}$ としたとき、SQUID の合成インダクタンスは $\sqrt{E_{J,1}^2 + E_{J,2}^2 + 2E_{J,1}E_{J,2}\cos(\varphi_{\text{ext}}/\varphi_0)}$ となる (φ_0 は磁束量子 $h/2e$ である)。この可変性は非常に強力で、これにより量子ビットの周波数を数 GHz という広い帯域にわたり容易に動かすことができる。

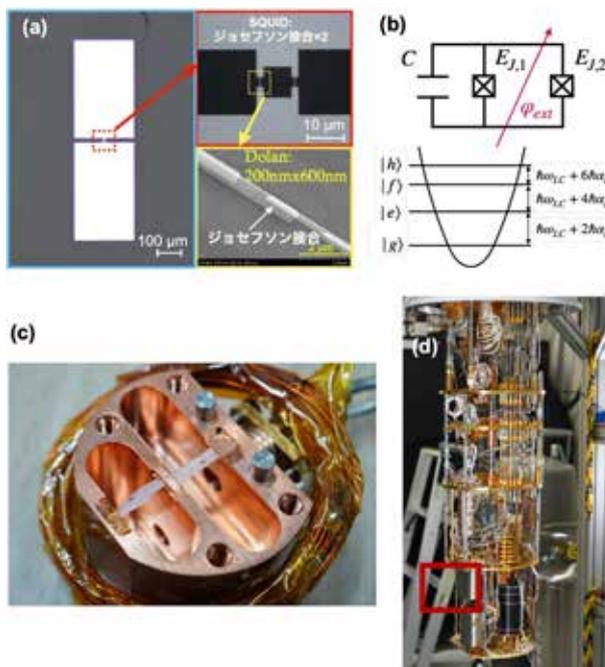


図 2: (a) SQUID 型超伝導量子ビットの概観, および (b) その等価回路とエネルギー準位の模式図。 (c) 量子ビットと読み出し共振空洞の合成系。サファイアの基板の上に量子ビット (a) が作製されており, 外に巻いている超伝導コイルに通電することで SQUID の磁束バイアスが行われる。 (d) 実験に使用している希釈冷凍機。赤枠の磁気シールドに (c) が入っている。

状態操作は, $|g\rangle$ と $|e\rangle$ のエネルギー差に相当する周波数のマイクロ波照射によって行う (Rabi 振動)。線形 LC 回路ではエネルギー準位差が等間隔なため全準位が同時に操作されてしまうが, ジョセフソン接合の非線形性で非調和性を導入することで $|g\rangle$ と $|e\rangle$ を選択的に制御することが可能になっている。照射するマイクロ波は強度・時間・位相が調節可能であり, これによって Bloch 球上の任意の点に量子ビットの状態を持っていくことができる。また 2 つの量子ビットを回路で結合させた状態でマイクロ波を照射することで, 2 ビットゲートも実装できる。状態の読み出しには, 通常「分散読み出し」というテクニックが使われる。これは量子ビットを線形共振器素子 (共振空洞もしくは平面導波路共振器) と結合させたとき, 共振器周波数が量子ビット状態に依存することを利用している。これにより共振器周波数のマイクロ波を共振器+量子ビット系に打ち込み, 透過成分の位相から量子ビットの状態を決定することができる。

超伝導量子ビットがすばらしいのは, 外部との結合が極めて強いという点にある。これによって状態読み出しや, ゲート操作を正確かつ高速に行うことができる。単一ビットゲートは数 10 ns, 2 ビットゲートはおよそ 100 ns, 状態読み出しは数 100 ns が典型的な所要時間である。超伝導方式が現在量子コンピューターの最も有力なプラットフォームになっているのは, 主にこのアドバンテージによるものである。¹またこのような外界との強結合があるにも関わらず一定のコヒーレンス時間も確保できている。現在典型的に 100 μ s, 最もよい例で数 ms が達成されている [7]。特にここ 20 年来の目覚ましい発展によって量子エラー訂正に必要な水準を超えつつあり, コンピューターとして成立する見通しが立ってきているのは特筆すべきである。

超伝導量子ビットの強結合の根源は, その巨大な電気双極子モーメントにある。単一原子と比較して $O(10^6)$ 倍という大きさであるが, これは $O(0.1)$ mm という素子のマクロな大きさに起因している。「マクロな物体であるにも関わらず単一量子レベルで制御できる」という奇跡的状况の帰結とも言ってもよいが, これのおかげで超伝導量子ビットは, 電場 (光子) に対する極めて敏感なセンサーとなる。センサーとしての使い方は主に 3 通りある。1 つは ac Stark shift と呼ばれる, 量子ビットの周囲に交流電場があった際に生じる量子ビット周波数のシフトを検出する方法である [8]。Ramsey 分光法が通常用いられ, 標準量子限界以下の検出感度が既に達成されている [4]。2 つ目は, 四光波混合を利用した SMPD (Single Microwave Photon Detector) と呼ばれる方式 [9] であり, 離れた場所にある単一光子レベルの信号を検出可能であることかつ, ダークレートは 1 つ目の方式に肉薄し

¹他の方式では 2 ビットゲート操作に顕著な困難を抱える。

4(a)]。量子ビットと共鳴していること、コヒーレントな光であることという条件は必要となるが、これを満たせば野良の信号も量子ビットの制御信号も本質的に違いはないということである。ありがたいことに波状ダークマターはコヒーレント状態で存在しているため、そこから転換された光もコヒーレントである。無偏極なダークフォトン・ダークマターの場合、自由空間である時間 t 量子ビットを晒したとき $|e\rangle$ に励起する確率は:

$$p_{ge}(t) \simeq 0.04 \times \kappa^2 \left(\frac{\epsilon}{10^{-11}} \right)^2 \left(\frac{E_{ge}}{1 \text{ GHz}} \right) \times \left(\frac{C}{0.1 \text{ pF}} \right) \left(\frac{d}{100 \text{ } \mu\text{m}} \right)^2 \left(\frac{t}{100 \text{ } \mu\text{s}} \right)^2$$

となる [10]。ここで ϵ はダークフォトンと光子の kinetic mixing parameter, C は量子ビットのキャパシタンス, d はキャパシタンスパッド間距離, κ は量子ビットを囲うパッケージによる信号遮蔽係数 (自由空間では $\kappa = 1$) である。ダークマターが量子ビットを励起する時間 t は、量子ビットのコヒーレンス時間 ($\sqrt{T_1 T_2}$) が上限である。典型的な回路パラメータと実験制限付近の ϵ で、状態測定一回あたり $O(1 - 10) \%$ という高い励起率が期待できる。

既存の ac Stark shift を使ったマイクロ波光子検出法と比較すると、直接励起法では共鳴を利用する分より高感度であるが周波数の掃印が必要となる。また検出に量子ビットの状態操作が不要で、 $|g\rangle$ の読み出し精度だけが問題となるため、偽信号が非常に少ないという特徴もある。 $|e\rangle$ を $|g\rangle$ にするようなノイズは無数にあるが、 $|g\rangle$ を $|e\rangle$ として検出する原因は、基本的に熱励起と読み出しエラーの2つしかない。これらは典型的な超伝導量子コンピューターのセットアップにおいてはともに 0.1% 以下に抑えることができる。信号のレートを稼ぐために一定の水準を超える必要はあるものの、量子ビットのコヒーレンス時間やゲートエラー率に対する要求が比較的低いというのは実務的には大きなメリットである。

実際に狙う信号は非常に微弱であるため、Rabi 振動周期は量子ビットのコヒーレンス時間よりはるかに長く、振動の最初のわずかな立ち上がりを捉える勝負となる。プロトコルとしては「一定間隔放置したあと量子ビットの読み出しを行う」という操作を多数繰り返して $|e\rangle$ の割合 (励起率) を測定し、それを量子ビット周波数を変えてまた繰り返す [図 4(b,c)]。特異的な励起率をもつ周波数が見つかった場合、その周波数においてさまざまな追試を行ってノイズとの切り分けを試みる。例えば読み出し間隔時間を色々変えたときに励起率がそれに依って単調に変化するかというのは有効なテストとなる [図 4(d)]。感度は1ビットでも悪くなく、例えばダークフォトン・ダークマター探索においては、共振器やディッシュアン

テナといった「光を集める」機構がなくても $\epsilon < 10^{-12}$ の感度が期待できる。

直接励起法では上で述べた共振空洞実験の3つのネックを全て解決している。すなわち (1) 量子ビットの周波数調整は容易であり、(2) 光を波としてではなく量子ビットの状態に射影して検出するため標準量子限界にはかからず、(3) パワーではなく量子ビット周辺の電場を検出する方法なので体積依存性はない。⁴自由空間に置いた1粒の量子ビットでは、絶対的な感度では共振器には劣るものの、後述する拡張によって様々な改善が可能である。

実験の状況 2024年に自作した量子ビットと共振空洞からなるサンプル [図 2(c,d)] を使用した初のパイロット探索を行った。このとき得られた励起率の分布は図 5(a) であり、信号モデルに整合する narrow width peak が見つからなかったことを受けてついたダークフォトン・ダークマターへの制限が図 5(b) の下図の緑部である。この実験では量子ビットの周波数調整に使ったコイルの発熱を適切に処理できなかったこと (サンプルが 100 mK 以上になり励起率が 7-10 % と高止まりした)、使用した量子ビットの寿命も非常に短かった ($T_1 = 3 \text{ } \mu\text{s}$, $T_2 = 1 \text{ } \mu\text{s}$) 影響で感度は当初の想定より大分悪かったが、それでも CMB の制限を超える感度を達成している。これらの問題は比較的短期的に解決が可能であるが、それが達成された場合の予想感度は図 5(b) の網掛けの通りである。またこの実験では1周波数あたりの測定時間はおよそ6分間で、その間に 10000 回の「読み出し→放置」サイクルと、量子ビット寿命測定などの較正を行っている。全体およそ 16 時間で 7 MHz の幅をスキャンしているが、将来的には RFSoc を使った I/O の最適化・較正の高速化などでおおよそ 5 倍程度のスキャン速度改善を見込んでおり、実験トータルで 1 年で 1-10 GHz の領域をカバーすることを目指している。ところでここまでは基本的に自由空間に漂う光を検出するセットアップを想定していたが、極板と鏡でダークマター由来の光を集光する広帯域実験 (ディッシュアンテナ実験: DOSUE-RR, BREAD, BRASS-p など) に組み込むことも可能である。極板の面積を A とすると、信号レートは $A/\lambda_{\text{Compton}} \sim O(100 - 1000)$ 倍、感度は ϵ で 1-2 桁改善される。これは共振空洞実験と比べても遜色ない感度である (後述)。

量子コンピューターをダークマター検出器として使う 直接励起法を用いたダークマター探索のもう一つの特徴として、既存の超伝導量子コンピューターの系に素直に組み込めるという点がある。現在 IBM [14] や IQM [15] など複数の企業が一般利用可能な超伝導量子コンピュー

⁴電子レンジ (食材がマイクロ波を全部吸うため加熱時間は体積でスケール) とトースター (何枚焼いても同じ時間) の関係と同じである。

³自然放出や、環境の2準位系への脱励起など。

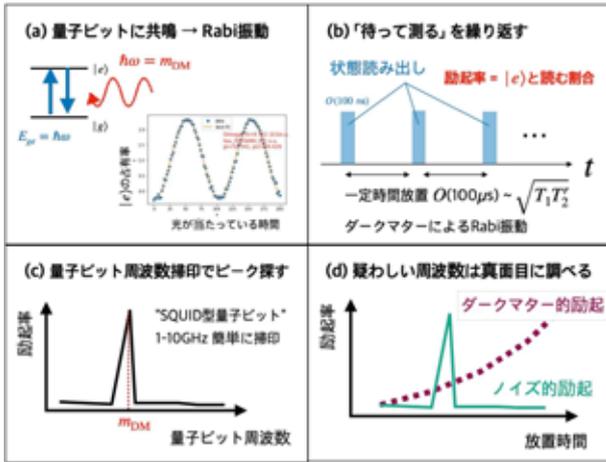


図 4: 直接励起法を使った波状ダークマター探索の概要。

ターのクラウドサービスを提供しているが、使用できるビット数、状態読み出しの精度、コヒーレンス時間などにおいてこれらの実機は圧倒的に優れているため、サービスの制約の中に問題をうまく落とし込めればダークマター検出器としても高いポテンシャルを発揮する。実際図 4(b) で紹介したようなプロトコルは delay と読み出しを交互に繰り返す極めて単純な量子回路に相当するが、これは 50 行程度のスクリプトで実行することが可能である。図 6 は IBM-Quantum の実機 (IBM-Kawasaki) で 115 ビットを用いて行った実験の結果である [16]。1 分程度の実行時間で 115 周波数を同時に探索可能で、手間がほぼかかってない割にまずまずの感度がある一方で (1) 周波数調整が難しい (特殊な方法を用いない限り数 10 MHz 程度が限界)、(2) 量子ビットチップを覆う金属ノイズシールドによるダークマター信号の遮蔽 (標準的なデザインを考えた場合 1/100 以下に抑制される)、(3) 回路パラメータ (C, d) を公開していない (発見能力はあっても棄却制限を正確に計算できない) といった回避困難な課題も多数あり、サービスの枠組みの中で完全にぶら下がるには限界がある。量子コンピューターのプラットフォームに準拠しつつ、ノイズシールドや制御方法に関してはダークマター探索用にカスタマイズできるという状況が最も理想的であるが、現在その道を模索すべくフィンランドの超伝導量子コンピューターベンダーである IQM 社と協力して予備的な共同研究を開始している。

ダークマター信号増幅量子回路 量子コンピューターの実機で適切な探索実験が行えた場合の大きな楽しみの一つに、多数のビットからなるエンタングル状態を使った信号増幅がある [17]。例えば n ビット系において、図 7 のようなプロトコルを考える。最初に CNOT などの 2 ビットゲートを用いて最大もつれ状態 (GHZ 状態: $|\Psi(t_1)\rangle =$

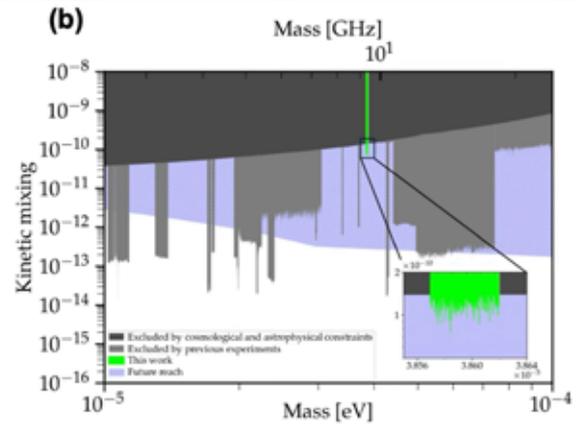
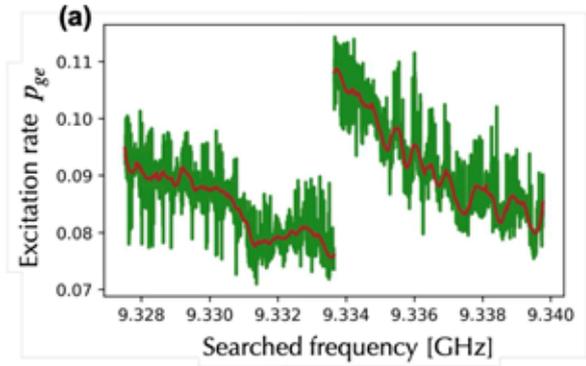


図 5: DarQ-Direct の最初のパイロット実験の結果 [13]。(a) 量子ビット周波数を掃印して得られた励起率分布。(b) ダークフォトン・ダークマターに対する既存の制限 (濃灰: CMB からの制限, 淡灰: 共振空洞実験など直接探索からの制限) と本実験で得られた制限 (緑)。網掛けは測定温度を 30 mK まで下げて量子ビットの寿命を 100 μs まで伸ばせた場合の 1 年間で達成できる棄却感度。

$(|+\rangle^{\otimes n} + |-\rangle^{\otimes n})/\sqrt{2}$ を生成し、⁵量子ビットの周波数を揃えた状態で一定時間放置してダークマターによる励起 $(|\Psi(t_2)\rangle = (e^{in\delta}|+\rangle^{\otimes n} + e^{-in\delta}|-\rangle^{\otimes n})/\sqrt{2})$ を経たのち、逆操作を行って各ビットが稼いだ時間発展の和を 1 ビットに押し付けて読み出す $(|\Psi(t_f)\rangle = \{\cos(n\delta)|g\rangle + i\sin(n\delta)|e\rangle\} \otimes |+\rangle^{\otimes(n-1)}/\sqrt{2})$ 。各々のビットを個別の検出器として扱ったときは信号レートは n 倍になるところ、このようなエンタングル状態を使った集団励起では位相の足し合わせになるため信号レートは n^2 倍になる。⁶これは n が大きくなった場合には強力なゲインであり、広い探索領域を維持しつつ共振空洞実験に匹敵する探索感度を与える究極の実験になりうる。エンタングル状態としてのコヒーレンス時間は $1/n$ になるため、個別の量子ビット励起の場合と同等の励起時間を確保するためには、それぞれの量子ビットのコヒーレンス時間

⁵ $|\pm\rangle$ は $(|gg\rangle \pm |ee\rangle)/\sqrt{2}$ で定義される状態である。

⁶超放射と同じ原理で「 n ビットのうち誰が励起したかわからない」という不可分性による干渉効果である。

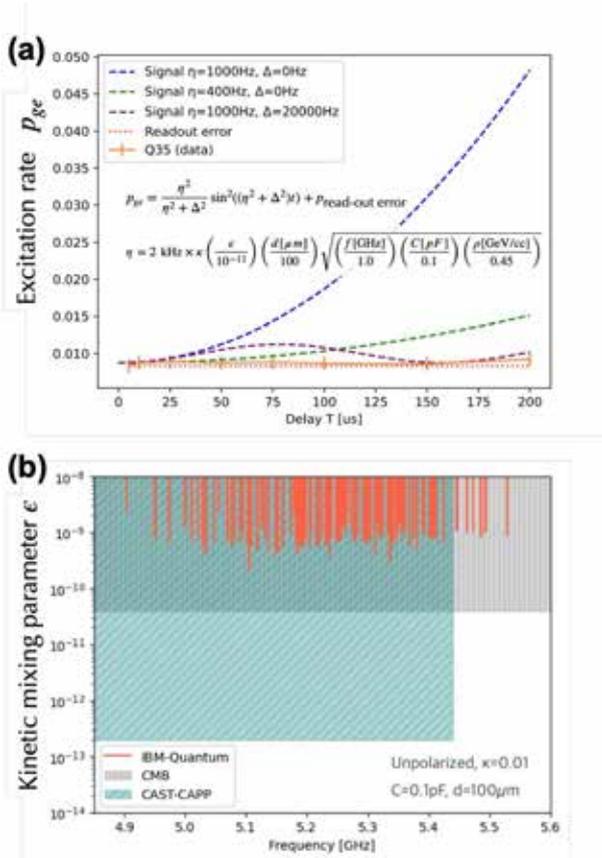


図 6: IBM-Quantum で行った探索の結果 [16]。(a) あるビットにおける励起率測定の実例。読み出し間隔時間 (delay) による依存性は観測されず、この周波数において一定以上の強度のダークマター信号は棄却される。(b) 測定に使った 115 ビットによる棄却感度予想。IBM は量子ビットの詳細を公開していないため、回路パラメータ (C, d) とチップパッケージによる遮蔽効果 (κ) は典型的な値を仮定している。

も今よりおよそ n 倍伸ばす必要があるなど、 n が大きい系で実現するためには多くのハードル予想されるが、これらは将来商用の量子コンピューターに向けて解決せねばならない問題そのものである。この先の技術革新によってこれらが自然に解決されることを仮定するのはそこまで無責任ではないであろう。また、GHZ 状態以外のエンタングル状態の検討も進んでいる。 W 状態 ($(|egg\dots g\rangle + |geg\dots g\rangle + \dots + |ggg\dots e\rangle)/\sqrt{n}$) を使ってバックグラウンドを抑制するプロトコル [18]、さらには、量子ビット操作を通じて共振空洞に特殊な準備状態を作り (n -Fock 状態や猫状態)、信号をさらに増幅するプロトコル [19, 20] が既に実証されており、量子技術ならではの信号増幅の原理検証が進んでいる。

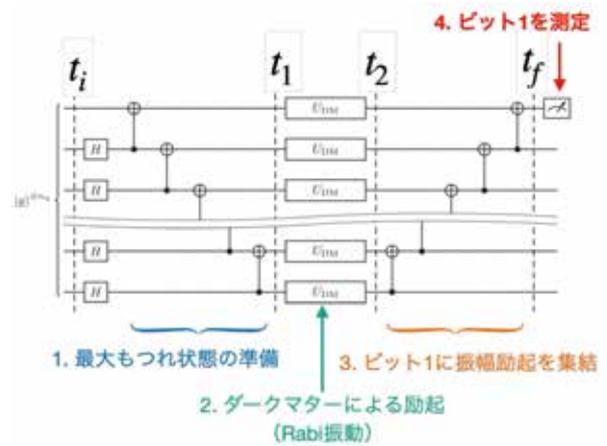


図 7: 最大エンタングル状態 (GHZ 状態) を使ったダークマター信号増幅のプロトコル。 n ビットを用いたとき信号レートが n^2 に比例するようになる。

5.2 DarQ-Lamb

直接励起法を用いた DarQ-Direct は広帯域の探索を得意とするが、絶対的な感度は現状共振空洞実験に及ばない。従来の共振空洞実験の原理に基づきつつも最新の量子技術を導入することで、高感度を維持しつつ帯域を広くすることを目指すのが DarQ-Lamb 実験である。

Lamb shift 超伝導量子ビットを共振空洞の中に置いたとき、共振モードを通じた結合が生じる。最も単純には Jaynes-Cummings モデル:

$$\hat{H}_{\text{JC}} = \hbar\omega_c \hat{a}^\dagger \hat{a} + \frac{\hbar}{2}\omega_q \hat{\sigma}_z - g\hbar (\hat{a}\hat{\sigma}_+ + \hat{a}^\dagger \hat{\sigma}_-)$$

によって記述される。ここで g は共振モードと量子ビットの結合定数、 ω_c, ω_q はそれぞれ孤立状態のときの周波数である。 $|\omega_c - \omega_q| \gg g$ の極限では (分散領域):

$$\hat{H}_{\text{JC}} = \hbar \left(\omega_c + \frac{g^2}{\Delta} \hat{\sigma}_z \right) \hat{a}^\dagger \hat{a} + \frac{\hbar}{2} \left(\omega_q + \frac{g^2}{\Delta} \right) \hat{\sigma}_z + O(g^3)$$

となり ($\Delta := \omega_c - \omega_q$)、結合によって超伝導量子ビット・共振空洞それぞれの共鳴周波数が g^2/Δ だけシフトする。特に後者は Lamb shift と呼ばれる。量子ビットの素の周波数 ω_q は SQUID 型量子ビットを用いて外部磁場を通じて容易に変調できるため、これにより Lamb shift を通じた共振空洞の周波数の変調が可能になる。ここで重要なのは、従来の古典的な変調方法で問題となっていた物理的に極低温下でものを動かす必要がなくなった点である。超伝導量子ビットのコヒーレンスは無酸素銅の共振空洞よりも高いため、共振空洞の Q 値を保ったまま容易に変調を実現できる理想的なセットアップとなりうる。

実験の状況 DarQ-Lamb 実験は、変調機構として Lamb shift を用いた共振空洞実験である [21]。DarQ-Direct 実験と同様、図 2(a) のように共振空洞中に SQUID 型量子ビットを配置したセットアップで、外に巻いたコイルによって量子ビットの周波数を変更する。2024 年に初のデモンストレーション実験を行い、空洞周波数変化を実証した [図 8(a)]。またこのセットアップで同時にダークフォトン探索実験を行った。空洞周波数をスキャンしながら各周波数で共振器内のパワーを測定し、標準的な共振空洞実験の手続きを用いて特異な周波数の探索を行った。パイロット実験で変調幅が限られていた (~ 10 MHz) こともあり発見には至らなかったが、今まで探索されることがないダークフォトンのパラメータ領域に対して制限を設けた [図 8(b)]。この周波数変化幅は上記の通り、共振空洞と量子ビットの結合の大きさで決まっているため、今後は強結合領域での運用を実現し、飛躍的に変調幅を広げることを目指している。

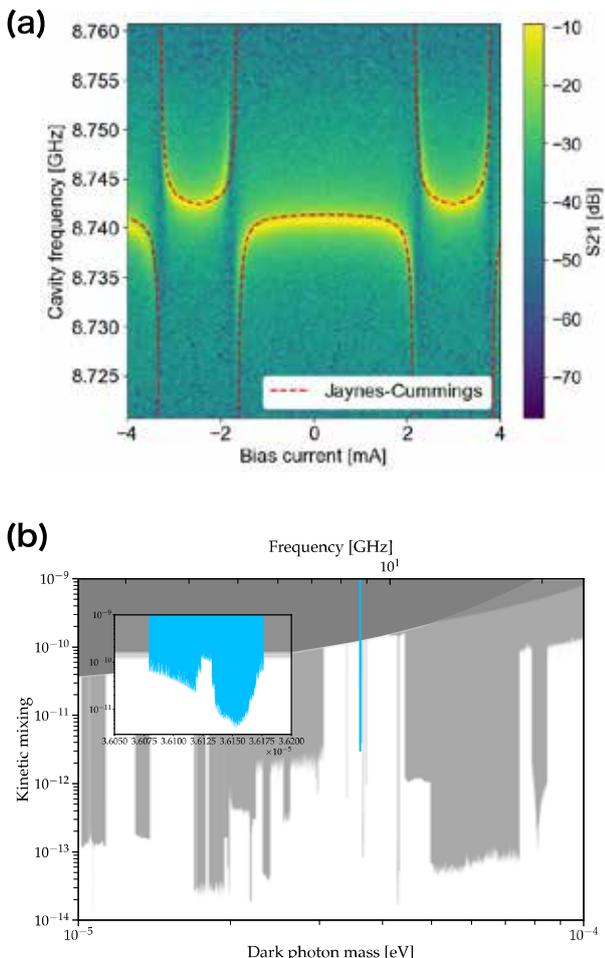


図 8: (a) 量子ビットを用いた共振空洞の周波数調整。横軸がコイルに流した電流 (SQUID を貫く磁場の大きさ)、縦軸は共振空洞の周波数。モデルに沿って動いていることがわかる。(b) 本実験で得られたダークフォトン・ダークマターに対する制限 [21]。

量子アンプの導入と単一光子検出 現在の DarQ-Lamb 実験の感度は CMB の制限を大幅に超えているものの、本格的なアクシオン探索にはまだ十分ではない。一つの原因は、アンプのノイズである。現在は一般的な低ノイズアンプ (HEMT) を使用しており、ノイズを温度に換算したノイズ温度は数ケルビン程度である。超伝導量子コンピューターの読み出しや ADMX 実験などの最先端のアクシオン探索には通常 JPA (Josephson Parametric Amplifier) や TWPA (Traveling Wave Parametric Amplifier)、いわゆる量子アンプが利用されている。これらのアンプは HEMT アンプと違い、希釈冷凍機の最低温度ステージで動作可能であり、HEMT の 10 分の 1 のノイズ量である標準量子限界 ($300 \text{ mK}@10 \text{ GHz}$) まで改善可能である。量子アンプは既に市販の製品があり、KEK-QUP に今年度中に導入し感度を 10 倍増強する予定である。さらに、DarQ-Lamb 実験は前述した ac Stark shift を利用した単一光子検出と相性が抜群であり、それを導入した場合は感度はさらに 10 倍以上改善する。後述する磁場導入手法や共振空洞の改善と合わせて、次世代をリードするアクシオン探索実験の確立を目指す (図 9)。

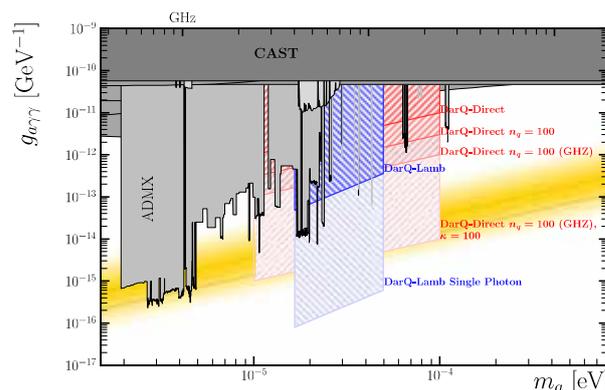


図 9: DarQ-Direct 実験 (赤) と DarQ-Lamb 実験 (青) のアクシオンに対する予想感度。現状の感度 (濃い青) に比べ、単一光子検出を利用すると 2-3 桁程度の感度改善余地があることがわかる (薄い青)。DarQ-Direct 実験は自由空間における実験では QCD アクシオンに届かないものの、ディッシュアンテナなどの集光機構を導入することにより (e.g. $\kappa=100$), QCD アクシオンに届く可能性がある。

6 量子ビットを作る・測る

6.1 超伝導量子ビットの製作

DarQ 実験では、東大野口研や理研 RQC からの協力を得て最近サンプルの提供もいただいているが、同時にこのようなトッププロの方々の監修をいただきながら

素粒子実験屋も自力で超伝導量子ビットの製作に努めている。これは長期的に素粒子・宇宙実験に特化したデバイスを着想する上での発想力や柔軟性を涵養する上で非常に重要だと考えており、また何より楽しい。

製作のあらまは以下の通りである (図 10)。超伝導量子ビットの製作はまずデザインの策定から始まる。特にキャパシタンスの大きさや間隔、ジョセフソン接合の寸法などは、共振モードとの結合定数・量子ビット周波数・エネルギー準位の非調和性などに関わってくるため最適化の対象である。主要なパラメータは市販の電磁界シミュレーションソフト (Ansys HFSS, comsol multiphysics など) や、Energy Participation Ratio 法を用いたフリーのライブラリ (pyEPR など) を基に決定できる。製作は半導体プロセスなどと同じくクリーンルーム内における微細加工で行われる。レーザーや電子線で描画し、それを型にしてあらかじめ用意した薄膜をエッチング、ないしは金属の蒸着によってパターンを作る。ジョセフソン接合の製作は中でも特にユニークなプロセスである。接合の作製手法は長い歴史があるだけに多岐に渡るが、現在ほとんどの超伝導量子ビット用のジョセフソン接合は斜め蒸着と呼ばれる手法で作製されている。この手法では真空蒸着中に基板の角度を変える必要があり、それが可能な専用のジョセフソン接合作製装置は国内には数が少ない。DarQ 実験は主に東大や京大のクリーンルームを使用しているが、ジョセフソン接合作製装置だけは OIST の共同利用装置を利用している。通常の量子コンピューターを研究する大企業や国策を担う研究所は自前のクリーンルームを持ち、必要な電子線描画装置やジョセフソン接合作製装置を同じクリーンルーム内に持つが、このように作製プロセス途中で他のクリーンルームに移動することは極めて稀である。とりわけ我々は nm スケールの微細加工を施した後、飛行機で沖縄に飛び、蒸着を終えた後東京に戻り、残りの作業をおこなう。基板中の不純物 (ホコリや有機物残渣、酸化物など) を極力減らし純粋な超伝導回路のみを作製することが良い量子ビット作製の絶対条件のため、このような途中で飛行機移動を挟むプロセスでまともな性能が出るかは極めて懐疑的であったが、最近コヒーレンス時間が数 100 μs の量子ビットの作製に成功した (図 11)。

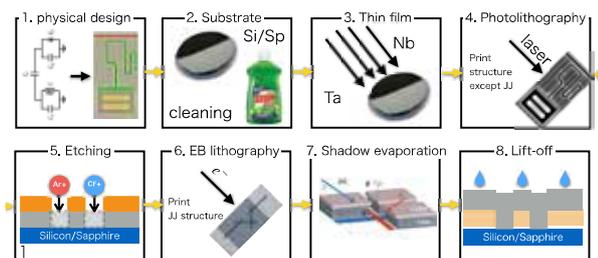


図 10: 超伝導量子ビット製作の典型的なワークフロー。

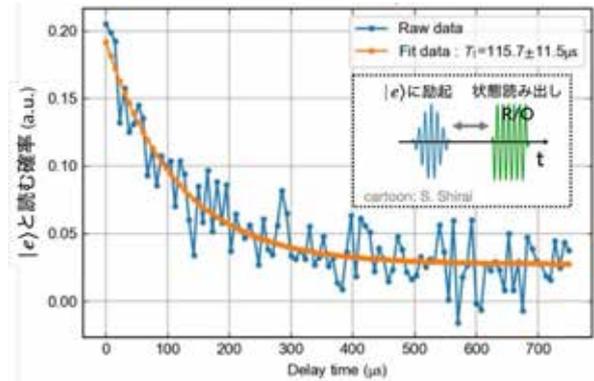


図 11: 東大 ICEPP 河井力氏が製作した超伝導量子ビットのコヒーレンス時間測定 (縦緩和時間)。量子ビットを $|e\rangle$ に励起した後一定時間放置し、状態を測定した際の $|e\rangle$ の割合を表している。

6.2 測定

ほとんどの超伝導量子ビットはアルミニウムでジョセフソン接合が作られているため、1.2 K 以下までその超伝導体としての性質は発現しない。動作周波数は数 GHz であることが多く、温度による量子ビットの熱励起を数% 以下に抑えるためには概ね 100 mK 以下の温度が必要であり、通常は希釈冷凍機を用いて 10 mK で測定する。DarQ 実験では東京大学低温科学研究センター・極低温量子プラットフォームにおける共同利用希釈冷凍機を主に使用している (図 12)。超伝導量子ビットの $|g\rangle$ と $|e\rangle$ は、任意波形発生装置を用いた電磁波パルスによってコントロールするが、これは外部と超伝導回路が同軸ケーブルなどの RF 回路で繋がっていることを意味し、主要なノイズの経路となる。したがって、希釈冷凍機内の電磁波の経路は赤外線フィルターやバンドパスフィルター、減衰器、アイソレータなどによって所望の信号以外は入りこまないように守られている。また、地磁気を代表とする磁場ノイズも主要なノイズ源である。超伝導量子ビットは複数層の高透磁率素材や超伝導シールドで守られ、同軸ケーブルや PCB 基板などもニッケル下地を排除して徹底的に非磁性化してある。

7 将来の展望

ここまで東大の低温センターの冷凍機を利用してきたが、共同利用設備であるため、その性質上占有した状態での長期運転を行うことができない。KEK-QUP 内で長期測定に向けた環境づくりを急ピッチで進めており、来年初頭には超伝導量子ビット専用の希釈冷凍機測定環境が整う予定である。また感度向上のための基礎開発も多岐にわたって進めている。以下にその一部を紹介する。



図 12: 東京大学低温科学研究センター・極低温量子プラットフォームでの作業風景。右手の金色の部分が発熱冷却機システム、中央に制御系のエレクトロニクスがある。

7.1 アクシオン探索

アクシオンは最も有望な波状ダークマターの候補であり、その発見は DarQ 実験の最終目標の一つである。DarQ-Lamb や DarQ-Direct に強磁場を導入できればアクシオン探索も可能であるものの、量子ビットに使われるアルミニウムやニオブなどの純金属の臨界磁場は総じて低く、ナイーブには強磁場と共存できない。最も直接的な方法として、超伝導薄膜に対して平行に磁場印加する方法がある。薄膜の厚さは 100 nm 程度であり、薄膜に完全に水平に磁場を印加すれば磁束は薄膜を貫きづら。幸運なことに、アクシオンの磁場との相互作用は $\mathbf{E} \cdot \mathbf{B}$ でかつ超伝導量子ビットの電気双極子モーメントは薄膜に水平であるため、アクシオン検出に理想的な磁場でもある。この方法で、既に 1 テスラまでの強磁場中でコヒーレントな超伝導量子ビットの操作が実現している [22]。

また、異なるアプローチとして磁場をかける領域（アクシオンの変換領域）とゼロ磁場の光子検出領域を分けるという方法も考えられる。これには 3 章の最後で紹介した 2 番目の方法である、超伝導量子ビットとの四光波混合を利用した手法が最も筋が良い。

DarQ 実験ではこれらの量子技術への強磁場導入可能性を多角的に検証し、将来的にアクシオン探索実験へとシフトしていく。

7.2 量子実験のための共振空洞開発

超伝導量子ビットは主要な量子コンピューティング実現の手段として認識されて久しいが、共振器は状態読み出しに欠かせない要素である。また、非線形 LC 共振回路ではなく、共振空洞内のフォトン数で $|0\rangle$ と $|1\rangle$ を表現

する bosonic encoding という手法も存在し、量子ビットそれ自体として活躍する場合もある。現在、KEK は ILC 超伝導加速器空洞の知見を生かした量子用の共振空洞を開発している。KEK iCASA 久保毅幸氏並びに NTT 物性科学基礎研究所の竹中崇了氏とともに単一光子レベルで最高の Q 値、約 10^9 を達成した [23]。この技術を活用しボソニックエンコーディングや、超高 Q 値の共振空洞を利用したダークマター探索も遂行する。また、KEK iCASA 井藤隼人氏とともに、 Nb_3Sn を使った強磁場耐性の高い空洞も開発中であり、アクシオン探索への準備も進めている。

7.3 センサー特化量子ビットの開発

これまでのところ量子コンピューターに使われている標準的な超伝導量子ビットを用いた実験を展開しているが、センサー応用に特化したパラメータ設計をすることで性能を上積みする余地がまだかなり大きい。特に量子コンピューターと違って、センサーの用途で要求されるコヒーレンスのレベルが必ずしも高くないため、光ないしは共振器モードとの結合をさらに強くするなどのアグレッシブな回路パラメータを追究することが可能である。また超伝導量子コンピューターでは 4-6 GHz の周波数の量子ビットがデファクト・スタンダードとなりつつあるが、センサー用途ではより広い範囲をカバーすることが望ましい。特に波状ダークマター探索において 10 GHz 以上は難しいことを踏まえ、現在 2 準位系のエネルギー差を大きくした高周波量子ビットの開発も行っている。

8 おわりに

量子コンピューター開発は、世界的企業や国家が主導する歴史的な開発競争の様相を呈し、（よくも悪くも）その展開の早さに比べると高エネルギー実験の発展は止まって見えるほどである。特に量子制御の技術は革命的なペースで日々新しいアイデアが世に生み出されており、これを高エネルギー実験に活用しない手はない。本稿で紹介したように、DarQ 実験では波状ダークマターを題材にして、実験提案から量子ビット作製、実験運用までを一貫して実施してきた。またダークマターにとどまらず、冷凍機外部の弱い電磁場の検出、高周波重力波やニュートリノ検出に超伝導量子ビットを使うアイデアが議論されており、量子技術を用いた素粒子実験という新しい分野創出に向けて着実に歩みを進めているところである。ゆくゆくは宇宙背景ニュートリノや量子重力といった、微弱な相互作用の検出を極めた先に佇む金脈に到達するのが究極の目標である。実現しきれないほどの

たくさんのアイデアがあるが、このような新しい領域に挑戦してくれる若い方々の参入を心から歓迎している。

参考文献

- [1] DarQ Collaboration,
<https://sites.google.com/view/darq-experiment/>.
- [2] A. D. O'Connell et al., *Nature* **464**, 697 (2010).
- [3] D. Lachance-Quirion et al., *Science* **367** 6476, 425 (2020).
- [4] S. Kono et al., *Nature Physics* **14**, 546 (2018).
- [5] Z. Wang et al., *Nature* **619**, 276 (2023).
- [6] 中村泰信, 応用物理 90 卷 4 号 209 (2021).
- [7] I. Siddiqi, *Nature Reviews Materials* **6**, 875 (2021).
- [8] A. Dixit et al., *Phys. Rev. Lett.* **126**, 141302 (2021)
- [9] L. Balembois, *Phys. Rev. Applied* **21**, 014043 (2024).
- [10] T. Moroi et al., *Phys. Rev. Lett.* **131**, 211001 (2023).
- [11] 新田龍海, 高エネルギーニュース **22-4** 166 (2022).
- [12] C. O'Hare, <https://cajohare.github.io/AxionLimits/>.
- [13] K. Watanabe et al. (DarQ collaboration), 20th Patras Workshop on Axions, WIMPs and WISPs (PATRAS 2025).
- [14] IBM Quantum, <https://www.ibm.com/quantum>.
- [15] IQM Resonance, <https://resonance.meetiqm.com>.
- [16] S. Chen and Y. Iiyama (DarQ collaboration), 19th Patras Workshop on Axions, WIMPs and WISPs (PATRAS 2024).
- [17] T. Sichanugrist et al., *Phys. Rev. Lett.* **133**, 021801 (2023).
- [18] H. Fukuda et al., arXiv[hep-ph] 2510.01816; arXiv[hep-ph] 2511.03253.
- [19] A. Agrawal et al., *Phys. Rev. Lett.* **132**, 140801 (2024).
- [20] P. Zheng et al., arXiv[quant-ph] 2507.23538.
- [21] K. Nakazono et al., (DarQ collaboration), arXiv[hep-ex] 2505.15619.
- [22] J. Krause et al., *Phys. Rev. Applied* **17**, 034032 (2022).
- [23] T. Takenaka et al., arXiv[quant-ph] 2510.01819.