

D-WaveのQPU環境のプローブとしての高コヒーレンス・フラクソニウム

ホワイトペーパー

概要

フラクソニウムは、D-Wave Quantum社のすべての技術にとって魅力的な量子ビット候補となっています。D-Wave Quantum社は、2次元の単一フラクソニウム試験回路を作製し、そのコヒーレンスが科学文献で報告されている最先端技術に匹敵することを確認しました。さらに、これらの量子ビットのデータから、D-Wave Quantum社の極低温システム内の電磁環境は、これまでに発表された超伝導量子ビットの最高の結果に匹敵することが明らかになりました。

はじめに

D-Wave Quantum社は、主に超伝導磁束量子ビットに基づく量子焼きなまし法 (QA) の技術で知られています[1]。このような量子ビットのエネルギースペクトルは、高エネルギー状態から十分に分離された2つの低エネルギー状態によって特徴付けられます。低エネルギー状態は、デバイス本体に通される磁束の量に依存する、2つの逆極性磁気モーメントの調整可能な重ね合わせとして記述することができます。このエネルギースペクトルの定性的な記述は、フラックス型量子ビットの幅広い設計に適用されます[2-4]。

フラクソニウム [4]は、フラックス型量子ビットファミリーの比較的新しいメンバーです。この量子ビットは現在、将来のゲートモデル量子コンピューティング (GMQC) 技術[5-8]のために検討されています。フラクソニウムには、少なくとも3つの魅力的な特性があります。第一に、フラクソニウムは、超伝導量子ビットの領域において、記録的な緩和 (T_1) 時間を生み出しています[9]。第二に、低エネルギー準位と高エネルギー準位の間には大きなエネルギーの隔りがあるため、状態リークとして知られる問題である低エネルギー多様体からの引用を防ぐことができます[10]。第三に、フラクソニウムは他の超伝導量子ビットよりもかなり低い周波数で動作させることができるため、制御の複雑さを軽減することができます。

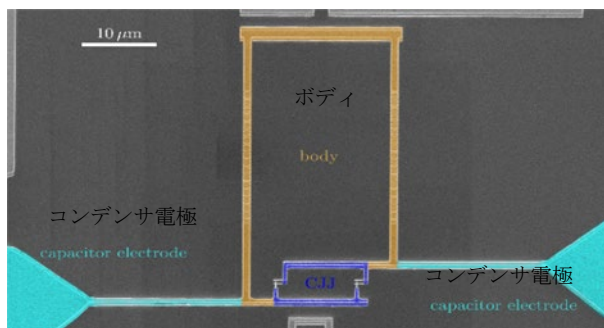


図1：D-Wave Quantum社製フラクソニウム量子ビットの走査型電子顕微鏡写真。

フラクソニウムへの関心が高まっていることと、D-Wave Quantum社がフラックス型量子ビットの量子技術構築に深い経験を有していることから、D-Wave Quantum社の技術開発のすべてにフラクソニウムのユニークな特性を活用する研究プログラムに着手しました。主なきっかけは、D-Wave Quantum社のQA量子処理ユニット (QPU) の電磁環境の特性評価に使用できる「ゴールドスタンダード」の高コヒーレンス・フラックス型量子ビットとして機能するフラクソニウムを作製することでした。しかしながら、当社は、将来のQAおよびGMQC技術におけるフラクソニウムの潜在的な使用可能性を検証するために、初期世代のフラクソニウム試験回路も使用しています。本報告では、D-Wave Quantum社によって作製され、QA QPUクライオジェニックシステムの1つで測定された単一フラクソニウム回路から得られた結果の一部を要約しています。当社のフラクソニウム・コヒーレンス時間は、2次元回路形状について科学文献で報告されている最先端技術に匹敵することが確認されました。また、有効量子ビット温度が非常に低く、これまでの文献で報告されている中で最高レベルであることも確認しました。この後者の観測は、D-Wave Quantum社のQPU環境に投入されたエンジニアリングの質の高さを証明するものです。

回路

D-Wave Quantum社が製造したフラクソニウム量子ビットの走査型電子顕微鏡写真を図1に示します。この量子ビットは、2つの閉じた超伝導ループで構成されています。1つは、2本の直線状に並んだ公称大きなジョセフソン接合 (JJ) で形成されるいわゆる超伝導体からなる大きなループで、もう1つは、2本の公称小さなJJを含む小さなループです。これらのループは、それぞれボディ、および複合ジョセフソン接合 (CJJ) と呼ばれます。どちらのループも、比較的低速のベースバンド制御線によってフラックス・バイアスをかけることができます。ボディループのみが量子ビットの状態操作のために高速の小振幅制御信号を受けます。量子ビットは、分散型読み出しとして使用される超伝導共振器と容量結合しています。ボディ・インダクタンス $Lq = 250\text{nH}$ 、ボディ・シャント・キャパシタンス $Cq = 6.5\text{fF}$ 、および最大 CJJ 臨界電流 $Iq = 28\text{nA}$ を持つ効果的な集中エレメント・モデル[1]によって、フラクソニウムの低エネルギー・スペクトルがよく特徴付けられます。

コヒーレンス測定

量子ビットのコヒーレンスは、緩和時間 T_1 とラムゼイ減衰時間 T_{2R} [11] という2つの標準測定法を用いて定量化しました。ここで紹介するすべての結果において、量子ビットはリセットプロトコルを用いて基底状態に準備され、その後ターゲットボディとCJJフラックスバイアスに調整されました。その後、状態操作、エボリューション、読み出しが行われました。低エネルギー多様体における2つの状態のエネルギー間隔 $Eq \equiv hvq$ を調整するために、CJJフラックスバイアスの範囲で測定が行われました。ここで h はプランク定数、 vq は周波数です。すべての測定は、ボディ・フラックス・バイアスがいわゆる縮退点に調節され、与えられたCJJバイアスに対する Eq が最小となります。このボディ・フラックス・バイアスでは、基底状態と第一励起状態は、それぞれ反対方向に分極した磁気モーメントの、偶数と奇数の重ね合わせとして記述できます。

T_1 測定値対 vq に対する測定結果の概要を図2の上段に示します。測定は極低温システムを $T_{\text{env}} = 7.3\text{mK}$ で安定させた状態で測定されました。データは $T_1 = 120\ \mu\text{s}$ の平均値についてばらつきを示しましたが、それ以外は弱い周波数依存性を示しました。これは、 $vq \approx 400\text{MHz}$ 付近で最大 $T_1 \sim 120\ \mu\text{s}$ を示す[12]に匹敵する結果とは対照的です。これは、当社の量子ビットの磁束ノイズが著しく低いことを示す可能性があります。

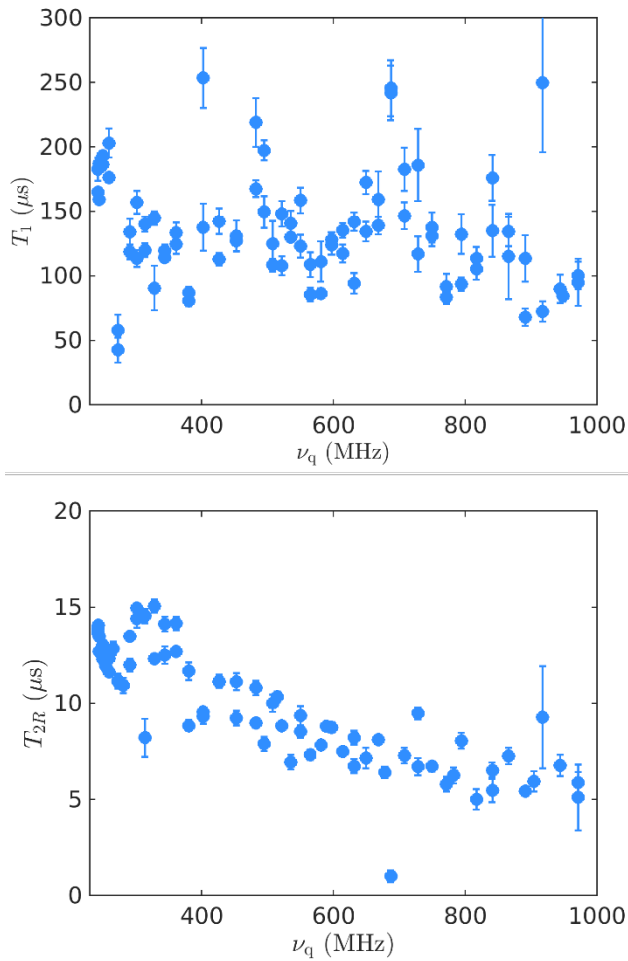


図2: (上)量子ビットが縮退した状態での緩和時間 T_1 と量子ビット周波数の対比。(下)量子ビットが縮退した状態でのラムゼイ・デフェーズ時間 T_{2R} と ν_q の対比。測定はすべて温度 $T_{\text{env}} = 7.3\text{mK}$ の環境で行われました。

ν_q に対する T_{2R} 測定値の概要を図2の下段に示します。これらのデータは、[12]で示されたデータから推測されるものと同様に、量子ビット周波数に対する単調依存性を示しています。すべての周波数で $T_{2R} \ll 2T_1$ という事実は、量子ビットの減衰が非常に低い周波数のゆらぎによって支配されていることを示しています。さらに T_{2R} の最大値は低周波数で観測されることから、低周波数フラックスノイズが支配的なデフェージングメカニズムではないことが主張できます。さらなる情報収集のために、エコー・シーケンスを用いた測定が行われています。

電磁環境

量子ビットの電磁環境を特徴付ける簡単な方法は、量子ビットが定常状態に達した後の励起状態確率を測定することです。これは、例えば、量子ビットを基底状態でリセットし、 π パルスを印加して量子ビットを励起し、緩和時間 T_1 の何倍にもわたって量子ビットを進化させ、最終的な励起状態確率を測定することによって行うことができます。あるいは、量子ビットをリセットして π パルスを与えず、測定前に T_1 の何倍にもわたって環境から励起させることもできます。いずれにせよ、励起状態の確率を共通の定常値に収束する必要があります。その励起状態確率は、量子ビットがその環境と熱平衡を達成したという仮定の下で、有効量子ビット温度 T_q に変換することができます。もし環境の温度 T_{env} を測定する独立した手段があれば、 T_q と T_{env} 比較することで有用な情報が得られます。もし $T_q = T_{env}$ が実験的分解能の範囲内であれば、環境には、熱的背景に対して無視できるほど過剰な光子が含まれていると結論付けることができます。もし $T_q > T_{env}$ であれば、電磁環境は過剰な光子を含んでおり、それは環境の温度ではない光源から来たものである必要があります。後者のシナリオは、非常に低い T_{env} では必然的に生じます。というのも、量子ビットに到達する制御線は、より温度の高い場所にある極低温装置からのエネルギーをQPU空間まで運ぶことができるからです。この影響を最小限に抑えるためには、入念なエンジニアリングが必要です。

図3は、 $\nu_q = 715\text{MHz}$ で動作する量子ビットを用いて、上述の方法で得られた T_q に対する環境温度 T_{env} の推定値をまとめたものです。 $T_q \approx T_{env}$ を $T_{env} = 18\text{mK}$ までの実験誤差の範囲内に収め、それ以下では T_q は飽和します。比較のために、他の超伝導量子ビットの科学文献で T_q の飽和値を探することができます。最も注目すべきなのは、超伝導量子ビットを研究している多くの研究者たちが、 $T_{env} = 18\text{mK}$ を報告していることです[3, 13, 14]。これらの量子ビットはすべて、当社のデバイスよりもかなり高い周波数、典型的には5GHz近い周波数で動作しており、そのためバイアス線の動作帯域幅を比較的大きくする必要があります。バイアス回路の帯域幅を広げると、必然的に量子ビットに到達するノイズが増えます。2次元[8]および3次元[9]測定の方で、このような高い帯域幅で動作するフラクソニウム回路は、 $T_q \geq 25\text{mK}$ をもたらしました。[12]では、当社の量子ビットと同様の周波数範囲で動作する2次元フラクソニウム回路についてより詳細な比較が報告されています。これらの著者たちは、 $T_q = 15\text{mK}$ を用しており、当社の結果と同等になります。

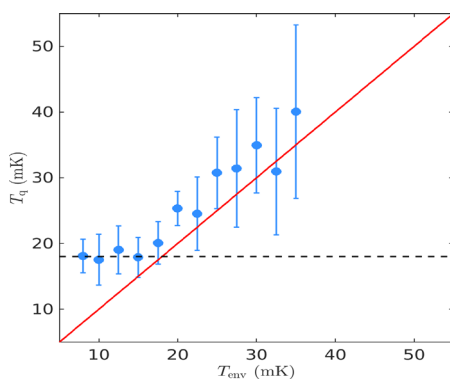


図3: $\nu_q = 715\text{MHz}$ における量子ビット温度 T_q に対する環境温度 T_{env} の推定値。 T_q は、黒の破線で示される T_{env} が低い限界では $18 \pm 3\text{mK}$ で飽和します。

次のステップ

当社は主に、QA QPUの電磁気学的環境をテストするための絶対的基準として、単一のフラクソニウム量子ビットを想定していましたが、当社の経験から、フラクソニウムが将来のD-Wave Quantum社の技術において選択される量子ビットになる可能性があると考えようになりました。エネルギースケールとコヒーレンス時間のトレードオフを考慮すると、フラクソニウムはQAの観点から興味深いものです[15]。同様にGMQCの観点からも、トランスモンなどの競合する超伝導量子ビットの既知の欠点を解決する手段として興味深いものです。この比較的新しい量子ビットは、D-Wave Quantum社の大規模超伝導QPUとその環境のエンジニアリングに関する深い専門知識と相まって、刺激的な機会をもたらすでしょう。

参考文献

- ¹ R. ハリス、J. ジョハンソン、A. J. パークレー、M. W. ジョンソン、T. ランティング他、「Experimental demonstration of a robust and scalable flux qubit、」 *フィジカル・レビュー B* 81、134510 (2010年)。
- ² T. P. オーランド、J. E. ムーイジ、L. ティアン、C. H. ヴァンデルウォール、L. S. レヴィートヴ、S. ロイド、J. J. マゾ、「Superconducting persistent-current qubit、」 *フィジカル・レビュー B* 60、15398-15413 (1999年)。
- ³ F. ヤン、S. グスタフソン、A. カマル、J. ビレンバウム、A. P. シアーズ他、「The flux qubit revisited to enhance coherence and reproducibility、」 *ネイチャー・コミュニケーションズ* 7、12964 (2016年)。
- ⁴ V. E. マスチャリアン、J. コッホ、L. I. グレイズマン、and M. H. デヴオレ、「Fluxonium: single cooper-pair circuit free of charge offsets、」 *サイエンス* 326、113-116 (2009年)、デジタル版：
<https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/science.1175552>
- ⁵ F. バオ、H. デング、D. ディング、R. ガオ、X. ガオ他、「Fluxonium: an alternative qubit platform for high-fidelity operations、」 *フィジカル・レビュー・レターズ* 129、010502 (2022年)。
- ⁶ L. B. グエン、G. コールストラ、Y. キム、A. モルバン、T. キストリニ他、「Blueprint for high-performance fluxonium quantum processor、」 *PRX Quantum* 3、037001 (2022年)。
- ⁷ L. ディング、M. ヘイズ、Y. ソン、B. カナン、J. アン他、「High-fidelity, frequency-flexible twoqubit fluxonium gates with transmon coupler、」 2023年、[arXiv : 2304.06087 \[quant-ph\]](https://arxiv.org/abs/2304.06087)
- ⁸ I. N. モスカレンコ、I. A. シマコブ、N. N. アブラモフ、A. A. グリゴレフ、D. O. モスカレフ、A. A. ピシュモチバ、N. S. スミルノフ、E. V. ズィキ、I. A. ロジオノフ、I. S. ベセディン、「High fidelity two qubit gates on fluxoniums using tunable coupler、」 *npj Quantum Information* 8、130 (2022年)。
- ⁹ A. ソモロフ、Q. フィッシュー、R. A. メンシア、H. ション、R. クズミン、V. E. マスチャリアン、「Millisecond coherence in a superducting qubit、」 *フィジカル* 130、267001 (2023年)。
- ¹⁰ B. M. ヴァルバノフ、F. パティステル、B. M. タラシンスキ、V. P. オストロウク、T. E. オブライアン、L. ディカルロ、B. M. テルハル、「Leakage detection for a transmon-based surface code、」 *npj Quantum Information* 6、102 (2020年)。
- ¹¹ N. F. ラムゼイ、「A molecular beam resonance method with separated oscillating fields、」 *フィジカル・レビュー* 78、695-699 (1950年)。
- ¹² H. サン、F. ウー、H.-S. クー、X. マー、J. チン、他。「Characterization of loss mechanisms in a fluxonium qubit、」 2023年、[arXiv : 2302.08110 \[quant-ph\]](https://arxiv.org/abs/2302.08110)
- ¹³ X. Y. ジン、A. カマル、A. P. シアーズ、T. グズモンセン、D. ホバー、他。「Thermal and residual excited-state population in a 3D transmon qubit、」 *フィジカル・レビュー・レターズ* 114、240501 (2015年)。
- ¹⁴ C. M. キンタナ、Y. チェン、D. シャンク、A. G. ベチュホフ、T. C. ホホワイト、他、「Observation of classical-quantum crossover of I/f flux noise and its paramagnetic temperature dependence、」 *フィジカル* 118、057702 (2017年)。
- ¹⁵ A. D. キング、S. ススキ、J. レイモンド、A. ズッカ、T. ランティング、他、「Coherent quantum annealing in a programmable 2,000 qubit Ising chain、」 *ネイチャーフィジクス* 18、1324-1328 (2022年)