

SQUID型超伝導量子ビットによる周波数変調を用いた ダークマターハロスコープ実験 東大理, 東大素セ^A

中園寛, 稲田聡明^A, 澤田龍^A, 陳詩遠^A, 寺師弘二^A, 新田龍海^A, 渡邊香凜

Abstract

ダークマターハロスコープ実験において、探索ダークマターの質量は共振器の共振周波数と対応関係を持つ。そのため、共振器の周波数変調機構の開発が探索の上で大きな重要性を持つ。我々は現在この周波数変調機構にSQUID型超伝導量子ビットを活用する手法を研究している。本講演では当研究の進捗状況および展望を報告する。

1.Introduction

Keyword: 波状ダークマター

ダークマター(DM)
・標準理論で説明できない
→性質解明が**新物理の発見**に繋がる

Wave-Like “波状DM” (~eV以下の軽量DM)[1]

波がcoherentな状態で揃っている
 $\lambda_{de Broie} \sim 100 \text{ m}$ ($m_{DM} \sim 10 \mu\text{eV}$)

アクション、ダークフォトン
・meVや μeV 範囲でDMの有力候補 (by cosmological experiment)
・電磁相互作用によって光子を放出

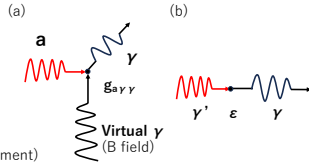


図1: 電磁相互作用による光子放出の例
(a) アクション (b) ダークフォトン

2.Method

準備

1. 超伝導量子ビットを**作製** (@U-Tokyo武田CR, OIST, EPFL)
2. Cavity内にqubitを配置
3. Cavityを希釈冷凍機に入れ、10mKオーダーまで**冷却**

計測

4. コイルにより**磁場を印加**、Qubitの共振周波数を変更
→ **detuning Δ が変化**
→ **Cavityの共振周波数も変調**
5. \uparrow を行いながらDM(=ダークフォトン)探索実験を行う。

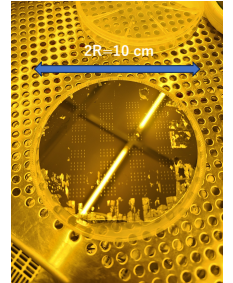


図5: 製作途中のQubitウエハ @武田CR

Keyword: ダークマターハロスコープ実験

空洞共振器 (Cavity) で光子(マイクロ波)を検出
→ダークマター(Cavity)ハロスコープ実験

Cavityの共振周波数と探索DMの質量が対応

→Cavityの周波数を変調させるシステムが重要!

先行研究(例: ADMX[2])
物理的な金属棒をCavity内に挿入・操作し境界条件を変更
→熱ノイズや電磁場のリーク

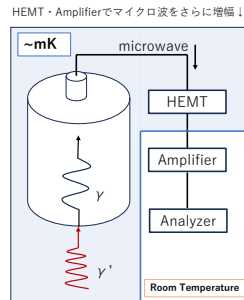


図2: Cavityによるダークフォトン探索実験の模式図

希釈冷凍機へのLoading

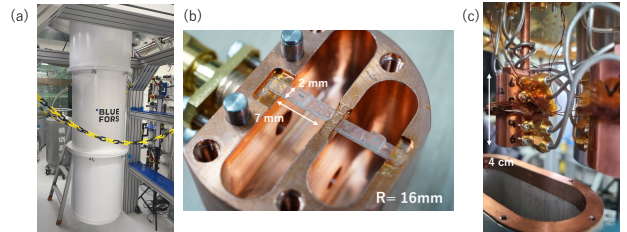


図6: (a) 希釈冷凍機 (b) Loadした銅Cavity/Sapphire-Qubit (c) 冷凍機への取り付け

Dark Photon limit

様々な研究チームがDark photonの質量探索を行っている[3]

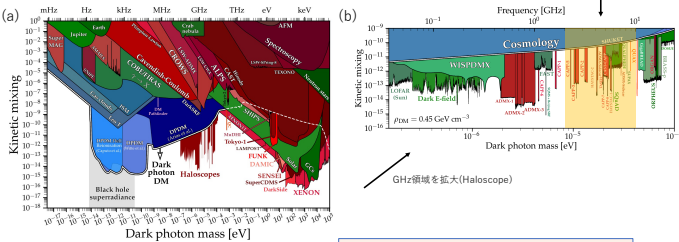


図3: Dark photonの質量サーチ 2Dplot
(a) 広域 (b) 狭域(GHz帯, ハロスコープ実験の主領域)

x-Axis : Dark photon mass
y-Axis : mixing parameter

超伝導量子ビットを用いた新たな手法を開発

3.Result

実際の測定結果

超伝導量子ビットによる 周波数shiftの結果

周波数変調帯...10 MHz程度
徐々にピークが崩れ始める
(Quality factor悪化)

本測定でのQubitを使った
ダークマター探索結果については現在
鋭意解析中

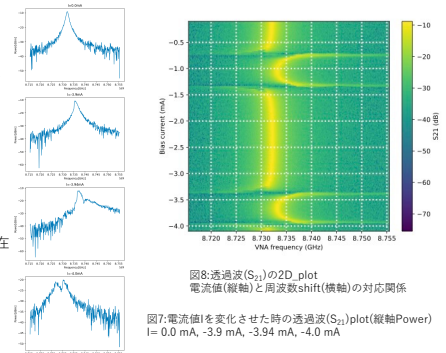


図8: 透過波 (S_{21}) の 2D plot
電流値(縦軸)と周波数shift(横軸)の対応関係

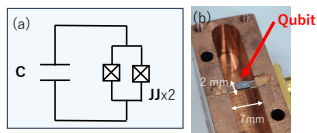
図7: 電流値を変化させた時の透過波 (S_{21}) plot(縦軸Power) $I = 0.0 \text{ mA}, -3.9 \text{ mA}, -3.94 \text{ mA}, -4.0 \text{ mA}$

Keyword: 超伝導量子ビット (Qubit)

巨大なパッド・二つのジョセフソン接合 (JJ)

非線形なエネルギー準位を持つLC回路と等価

本実験のSQUID型超伝導量子ビット
→磁場を印加することで共振周波数に変化



周波数変調

Jaynes-Cummings model

$$H = \frac{\hbar}{2} (\omega_q + \frac{g^2}{\Delta}) \sigma_z + \hbar [\omega_c + \frac{g^2}{\Delta} \sigma_z] a^\dagger a$$

Cavity's frequency shift

$$|\Delta| = |\omega_q - \omega_c|$$



図4: (a) LC回路の模式図
(b) Qubitのチップ/銅Cavity
(c) Qubit拡大図(光学顕微鏡10倍)
(d) JJ(SQUID)拡大図(150倍)

4. Discussion & Conclusion

- ・ SQUID型超伝導量子ビットを作製
- ・ 実際に変調し周波数変調を確認
- ・ 本実験で取得したDMデータの解析(進行中)

[Further study]

- ・ Qubitおよびコイルを導入したことによる探索感度への影響のstudy
- ・ 周波数変調の大規模化(~GHz)実際どのくらいのカップリングがいるのかestimation
- ・ アクション探索に向けた装置の改良 (→強磁場を印加する機構)

5.References

[1] L.Hui, Wave Dark Matter, Annual Review of Astronomy and Astrophysics 2021 59:1, 247-289 (2021)
[2] R. Khatiwada et al., Axion Dark Matter Experiment: Detailed design and operations. Rev. Sci. Instrum. 92 (12): 124502(2021)

[3] Caputo, A., Millar, A. J., O'Hare, C. A. J., & Vitagliano, E. (2021). Dark photon limits: A handbook. Physical Review D, 104(9). <https://doi.org/10.1103/physrevd.104.095029>
[4] 長田有登, やまざきれきしゅう, 野口篤史(2023). 『量子技術入門』. 東京大学出版会.