

岸本 康宏

東北大学 ニュートリノ科学研究センター

学術変革「地下稀事象」領域研究会 2024年7月5日 13:05~13:30 大阪大学 シグマホール

計画班 メンバー

- ・岸本康宏(ニュートリノ科学研究センター)
 - 研究代表, 空胴開発等
- 髙田 卓 (核融合科学研究所)
 - 分担者, 極低温とマグネット
- 沓間 弘樹 (東北大学 工学部)
 - 分担者,低ノイズ超伝導アンプ
- •研究では、他にも多くの方に、協力頂いています.
- •また、コラボレーションに参加して頂ける方、大歓迎です







WIMPs

- SUSYなど BSM
- WIMPs Miracle
 - 熱的に生成

• Cold DMの有力候補

Axion

- Strong CP Problem
- QCD相転移
 - 非熱的に生成
- Cold DMの有力候補

暗黒物質の謎を解明するためには, 両者を含めた,広い探索が必要

新たな物質観とアクシオン暗黒物質



Axionはいずこ



QCD axion mass, m_a [eV]





B01のアクシオン探索のねらうもの(その1)



- 広いAxion Window の中でも、高めの周波数領域をCavityを使って高感度で探索す
 - る. (具体的には ν > 7 GHz)

B01のアクシオン探索のねらうもの(その2)

- •第一段階(2024~2025)
 - 既存の技術と装置で、未探索領域(ν > 7 GHz, g~3×10⁻¹³ GeV⁻¹)を探索する.
 - 物理として結果を出しながら, R&Dを進める.
- •**第二段階**(2025~2028)
 - 3つのイノベーションで, KSVZ Axionにタッチする探索を行う
- •**第三段階**(将来)
 - ・ 強力で超大型マグネット,希釈冷凍機導入による更なる高感度化
 - •より高周波数側の開拓

第一段階(2024~2025)

- 周波数範囲
 - 先ず v = 7.35~7.9 GHz
- 主要な機器
 - RCNSで所有のマグネット, クライオスタット
 - 9 T, Ø110mm
 - T=3.8 K (無負荷)
 - 市販の極低ノイズアンプ
 - 4 \sim 8 GHz, $T_N = 1.5$ K
 - 6~9 GHz, $T_N = 1.6$ Kも最近発売されたので、それも利用する可能性あり
 - 4~14 GHz, $T_N = 3.1$ K





- マイクロ波空胴
 - シンプルな円筒空胴(~4.8 GHz)でPolit Runと探索
 - ドーナツ空胴(7.35~7.9 GHz)で探索







- B = 9 T, D = 110 mm
- 雑音温度 *T_{sys}* = 23 K
- ドーナツ空胴
 - $\nu = 7.35 \sim 7.90 \text{ GHz}$
 - $Q_L = 1.8 \times 10^4$
 - $\frac{\Delta v}{Q_L} = \sim 0.4 \text{ MHz/Scan}$ • $G = 3.9 \times 10^{-1}$
- 積分時間
 - $\tau = 600 \text{ s}$
 - (8.7 days for 0.5 GHz)

 $\rightarrow g = 2.5 \times 10^{-13} \text{ GeV}^{-1} \bigstar$

• $\tau = 12 \text{ h}$ • (2.4 MHz in 1 month) $\rightarrow g = 7.6 \times 10^{-14} \text{ GeV}^{-1} \bigstar_{6}$

第二段階(2025~2028)

- •3つのキーアイテムで、感度を向上し、QCDアクシオン領域に切り込む
 - 超伝導素子(共振器型 KIPA) による低雑音化
 - He超流動冷凍機による低雑音化
 - 大型の高周波共振空胴による信号の増強
- •より高い周波数の開拓も試みる
 - \sim 14 GHz







窒化物超伝導体を用いた共振器型 KIPA



M. Xu et al., PRX Quantum (2023)



共振器内をシグナル光が往復しながら ポンプ光のエネルギーを受け取り増幅 6

- ・窒化物超伝導体を用いることで、高い温
 皮でも動作(希釈冷凍機は必要ない)
 高磁場耐性(6Tでも動作との報告)
- 低雑音温度
 - *T_N~*2 K @ LHe温度
 - 量子限界@希釈冷凍機温度
 - 周波数帯域の最大は、ひとまず、13 GHz



φ360-mm

室温空間

4K GM冷凍機

Nb₃Sn

- 東北大 金属材料研所有のハイブリッ ドマグネット
 - 室温ボア 360mm 内で 9 T
 - ただし、1年目は実験期間1ヶ月







- •マグネット:
 - 東北大 金属材料研所有のハイブリッド
 マグネット
 - 室温ボア 360mm 内で 9 T
 - ただし、1年目は**実験期間1ヶ月**
- この室温ボアにフィットする、He
 超流動冷凍機を導入
 - 試料室サイズ **直径 290 mm**
 - Operation 温度 T=2 K
 - マグネットが使えない期間は, 暗黒光



高周波数に対応した共振空胴

Halo scopeを用いた暗黒物質アクシオン探索

•
$$P = \kappa g^2 V B_0^2 \rho_0 G_{lmp} \frac{1}{m_a} Q_c$$
, $G_{lmp} = \frac{\left(\int dV \, \vec{E} \cdot \vec{B_0}\right)^2}{|B^2|V \int dV \, E^2}$

- 空胴に関しては、 $VG_{\ell mp}Q$ が重要
- $G_{lmp} \ll 1$ としない工夫が必要
- つまり、節の無いモードの利用



• *G*_{ℓmp}~1 の大型, 高周波共振空胴





金研 強磁場 • B = 9 T, D = 290 mm

• 雑音温度 *T_{sys}* = 4 K

▶ Fishbone 空胴

- $\nu = 7.0 \sim 8.0 \text{ GHz}$
- $Q_L = 2.0 \times 10^4$

•
$$\frac{\Delta v}{Q_L} = \sim 0.4 \text{ MHz/Scan}$$

• $G = 4.1 \times 10^{-1}$

• 積分時間

•
$$\tau = 600 \text{ s}$$

• (8.7 days for 0.5 GHz)

 $\rightarrow g = 5.4 \times 10^{-14} \text{ GeV}^{-1}$

• $\tau = 12 \, h$ • (2.4 MHz in 1 month) $\rightarrow g = 1.9 \times 10^{-14} \text{ GeV}^{-1}$

	NIMS	金研 強磁場
磁場(T)	14	9
室温ボア(mm)	340	360

NIMS 大口径超伝導マグネット



☆ <u>He冷凍機はこれに合うように設計</u>



NIMS Option • B = 14 T, D = 290 mm

- 雑音温度 *T_{sys}* = 4 K
- ▶ Fishbone 空胴
 - $\nu = 7.0 \sim 8.0 \text{ GHz}$
 - $Q_L = 2.0 \times 10^4$

•
$$\frac{\Delta v}{Q_L} = \sim 0.4 \text{ MHz/Scan}$$

• $G = 4.1 \times 10^{-1}$

•
$$\tau = 600 \, \mathrm{s}$$

• (8.7 days for 0.5 GHz)

 $\rightarrow g = 4.4 \times 10^{-14} \text{ GeV}^{-1}$

• $\tau = 12 \, h$ • (2.4 MHz in 1 month) $\rightarrow g = 1.2 \times 10^{-14} \text{ GeV}^{-1}$

第三段階(将来)

- •本研究を成功裏に終え、次へ繋げる
 - ・更なる感度向上(DFSZモデルへ)
 - •より<u>強力なマグネット</u>の導入と運用
 - より低雑音な環境の構築
 - 低雑音アンプの開発・研究
 - 希釈冷凍機の導入と運用
 - より大きな信号
 - 共振空胴の大型化
 - ・高い周波数領域の開拓
 - 共振空胴
 - 他の手法 (Dish antennaなど)
 - 多チャンネル同時測定
 - 高周波数に対応した低雑音のアンプの開発・研究



Axion探索の将来計画での, マグネットの例____



Iseult:世界最大の臨床用 MRIマグネット (サクレー CEA研究所)



- 11.7 T
- * 常温ボア 900mm, 2,000mm(?) (全長は5,000mm)



ADMX-EFRに倣って • B = 9.4 T, D = 800 mm

- 雑音温度 *T_{sys}* = 0.325 K
- ▶ Fishbone 空胴
 - $\nu = 7.0 \sim 8.0 \text{ GHz}$

•
$$Q_L = 2.0 \times 10^4$$

•
$$\frac{\Delta v}{Q_L} = \sim 0.4 \text{ MHz/Scan}$$

•
$$G = 4.1 \times 10^{-1}$$

- $\tau = 600 \, \mathrm{s}$
 - (17.4 days for 0.5 GHz)

 $\rightarrow g = 3.4 \times 10^{-15} \text{ GeV}^{-1} \bigstar$

12.5 GHzまでの高周波化も達成したとして

B01のアクシオン探索がねらうもの(その3)

- ・相補性
 - WIMPs (B02, 03)と Axion(B01)と、そして<u>その他の暗黒物質候補</u>も
 - B01 では, Dark Photon 探索も行う.
- ・波及と拡大 → 即ち,極稀事象領域の拡大
 - その他の物理
 - Cavity QED など
 - 様々な技術
 - マイクロ波技術
 - 超伝導技術
 - 大型マグネット
 - 極低温技術

- これらの技術を個々に開発すると同時に、結集する必要がある
- ここで得られた技術を、関連分野を含めて展開し、波及を図る
- これらの技術は、開発されていたり、開発中の技術がある
- これらを結集し、Axion実験はもちろん、その他「物質の起源に 迫る研究」へ展開を図る

極稀事象研究領域の拡大

•例:量子コンピュータ分野へ

- 多量子ビット計算には、消費電力の小さな
 アンプが必須
 - 半導体量子コンピュータの場合、磁場の存在下でも稼働するアンプが求められている。
- ・強力な冷凍能力を持った希釈冷凍機の安定
 的運用



M. Xu et al., PRX Quantum (2023)

ポンプ光 シグナル光 アイドラー光 共振器内をシグナル光が往復しながら

ポンプ光のエネルギーを受け取り』増幅

- その他:
 - 要素1つ1つについて着実な進化を進める
 - 強力・大型マグネットによる強磁場環境
 - NbT+NbSn₃ で9T, Ø360
 - 微弱なマイクロ波を増幅して、測定
 - マイクロ波空胴と超伝導アンプ(共振器型KIPA)
 - 安定した極低温環境
 - He超流動冷凍機
 - これらを利用した新たな実験への試み
 - Ex: Experiment for chameleon dark energy
 - Chameleon photon conversion in magnetic field (532 nm laser, 2.33 eV)
 - CHASE (https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.105.261803)







440mW@1.8K 2.7W@4.3K 55W@45K



- •地下稀事象研究における,B01の位置づけ
- •B01が目指す「物理」
 - 3つのステップ
- •B01が目指す,「波及効果」と「領域の拡大」

みなさん、一緒に、この研究と領域を盛り上げていきましょう

