

極低温技術による 宇宙素粒子研究の高感度化

計画研究D02

【代表】

吉田齊(大阪大学): 低温検出器による $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索

【分担】

岸本康宏(東北大RCNS): 低温強磁場空洞の開発

石徹白晃治(東北大RCNS): 低温検出器による暗黒物質探索

美馬覚(情報通信研究機構・未来ICT研究所)

: 超伝導センサー、計測技術開発

研究機関異動

分担者追加

大谷知行(理化学研究所): 超伝導センサー、計測技術開発

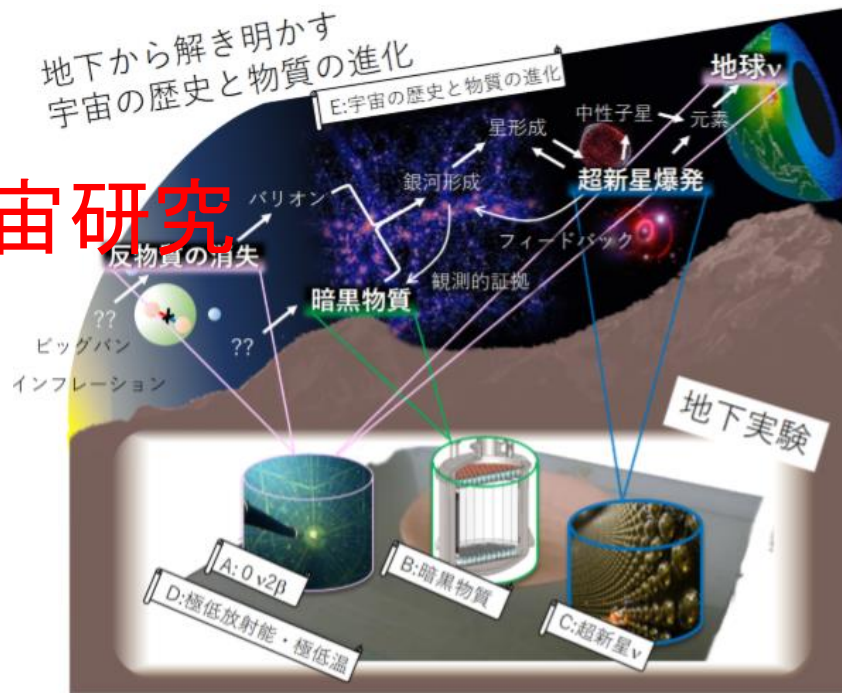
新学術領域「地下から解き明かす宇宙の歴史と物質の進化」

2021年領域研究会

2021年5月19,20,21日 @ オンライン

新学術領域「地下宇宙」

地下宇宙研究



D02班:極低温技術による宇宙素粒子研究の高感度化

- さらなる高感度化 → 極低温技術を取り入れる
- 低温・超伝導センサー、強磁場空洞 → 物理課題への応用・展開

連携

波及

領域内＋領域外

【公募】エアブリッジインダクタンスによる超伝導力学インダクタンス検出器の高感度化
埼玉大学 成瀬さん

計画研究D02の目的・手法

● 研究目的

3月 研究会 ● 極低温下での温度上昇を利用するScintillating-Bolometerを開発し、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊の $Q_{\beta\beta}$ 値(2~4MeV)領域でエネルギー分解能20 keV以下を実現する。

石徹白 ● 低質量WIMPsの探索を目的として、エネルギーしきい値10 eV以下の超伝導検出器を実現する。

● アクシオン探索への利用を目的に、超伝導強磁場共振空洞の開発を行い、通常よりも2桁以上高い共振空洞の増幅度(Q_c 値)を実現する。

5年、10年先の飛躍的發展を実現できる技術開発

● 共通のインフラ整備・計画班での連携 2019年度低温強磁場環境整備(済)

● 共通の極低温検出器開発用のインフラを整備し、そこを中心に連携して研究を推進する。有望な検出器技術の大型化前のR&Dを行う

石徹白 ● 地下実験室のクリーンルーム内に、極低BG素材を利用した希釈冷凍機を整備する。低BG測定まで実施する。 2020年度実施(済)

● 共通する超伝導センサー、マイクロ波計測などの技術を共同開発する

領域内での開発＋領域外との連携・協力

領域内外への波及

低温技術研究会・勉強会を開催

開始2年で「モノ」の整備は進んだ → 研究期間の後半で「事」を実施していく

低温技術研究会

連携・波及効果

- 計画研究D02主催の研究会

- 低温技術に関する研究会の開催

2019年度に第1回を開催

- 2020年度はコロナで開催の目途が立たず
→ Spot的にセミナーを開催

チュートリアル講演の企画1

半導体微細構造を用いた量子デバイス

講師: 大塚朋廣氏(東北大電気通信研究所)

日時: 2020年12月23日



共同研究の立ち上げ/研究費の応募

・東北大電通研: 共同利用課題(採択済み)

「半導体量子ドットの放射線応答」

・挑戦的研究(萌芽)

「半導体量子ドットデバイスの放射線応答の調査と放射線検出器への利用」

・学術変革領域(A)公募研究

チュートリアル講演の企画2

超伝導量子ビットに関する話題

講師: 中村泰信氏(東大先端研/理研)

日時: 2021年06月18日 10:00~ @仙台

(オンライン配信をします)



将来展望(野望):

Q-bitの放射線・宇宙線の影響調査

地下での測定

地下実験室での極低BG希釈冷凍機整備がカギ

発展的に勉強会を開催中 → 量子デバイス研究会

月1ペースで10~15人くらい

興味があればお声かけください

振動ノイズ, 読み出し, とか。。

2020/09/28 吉田 齊 超伝導センサーを使った極低温放射線検出器

2020/10/30 大塚朋廣 半導体量子ドット

2020/12/03 美馬 覚 MKID動作原理・製法など

2021/01/14 岸本 康宏 Axion, ALPの空洞を使った探索

2021/02/18 大塚朋廣 量子ホール効果とポイントコンタクト

2021/03/17 中山和則(東大) (軽い)暗黒物質探索と固体物理

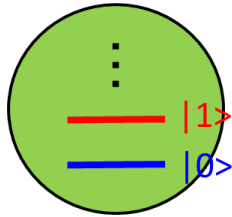
連携・波及効果

● 新規取り組み:「量子ドットデバイスの放射線応答の調査」

- 将来的な「放射線検出器への利用」への検討

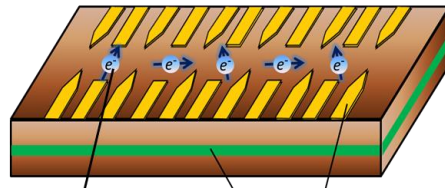
超伝導量子ビット

半導体量子ドット

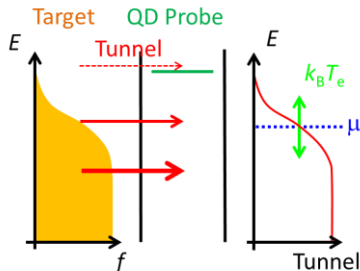


- ・ よく定まった人工量子状態
- ・ 量子状態を電圧で制御できる

局所的な電子状態を制御する
量子ビット



Electron spin 2DEG Metal gate



● 量子ドット中の電子スピン

- 長いコヒーレンス時間
- 初期化, 読み出し
- スピン状態操作 ESR + $\sqrt{\text{SWAP}}$
- 大規模化

【A.P.Vepsäläinen *et al.*, Nature 584, (2020) 551】

Article

Impact of ionizing radiation on superconducting qubit coherence

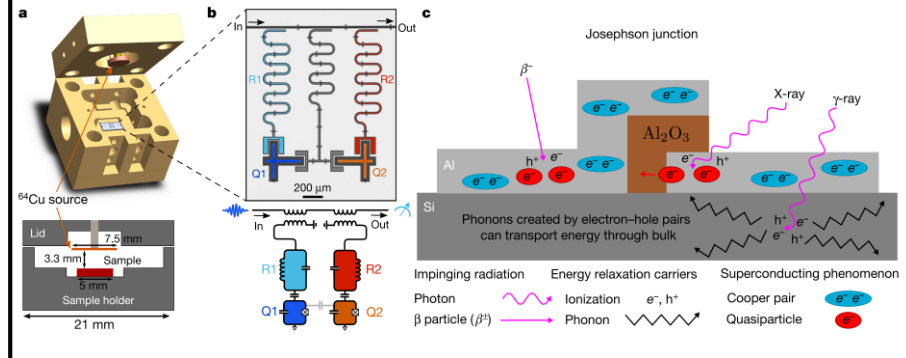
<https://doi.org/10.1038/s41586-020-2619-8>

Received: 25 January 2020

Accepted: 5 June 2020

Published online: 26 August 2020

Antti P. Vepsäläinen^{1,2}, Amir H. Karamlou¹, John L. Orrell^{2,3}, Akshunna S. Dogra^{1,4}, Ben Loer², Francisca Vasconcelos¹, David K. Kim⁵, Alexander J. Melville⁵, Bethany M. Niedzielski¹, Jonilyn L. Yoder², Simon Gustavsson¹, Joseph A. Formaggio¹, Brent A. VanDevender² & William D. Oliver^{1,3}



宇宙線による影響の調査?
(地下実験室の希釈冷凍機)

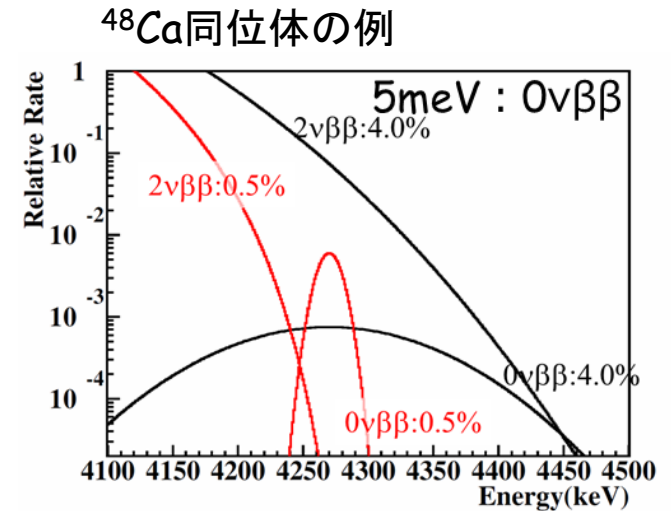
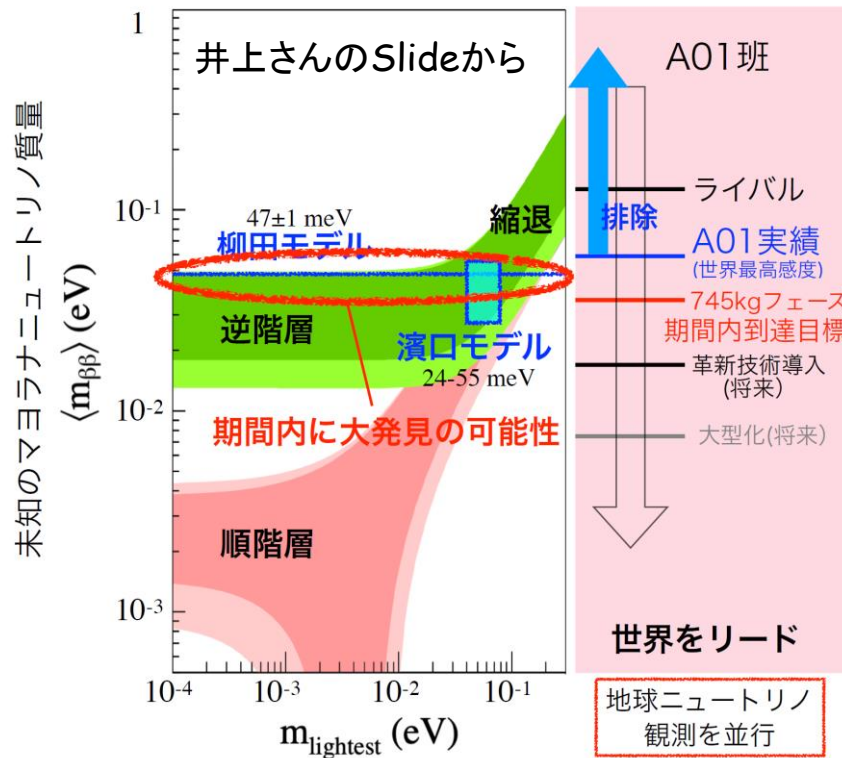
量子情報処理に向けた
スピン量子ビット

状態の放射線による影響の調査

CaF₂ Scintillating Bolometer開発

$0\nu\beta\beta$ 探索実験(A班)の高感度化

- A班: マヨラナ性の検証



- Inverted階層 $\rightarrow$ Normal階層領域の探索

- マルチトン規模の検出器の実現
- エネルギー分解能の飛躍的改善 (2 $\nu\beta\beta$ 事象 + ^8B 太陽- ν によるBGの低減)

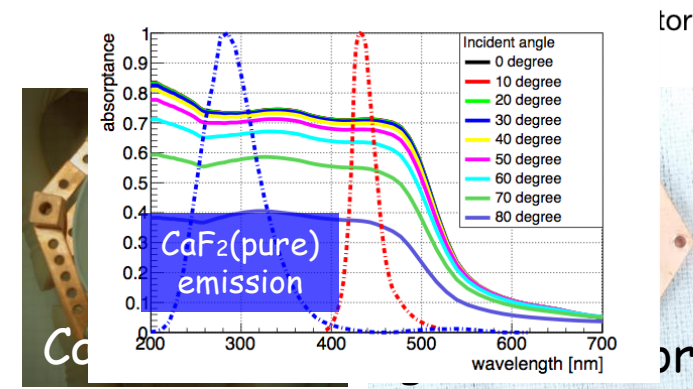
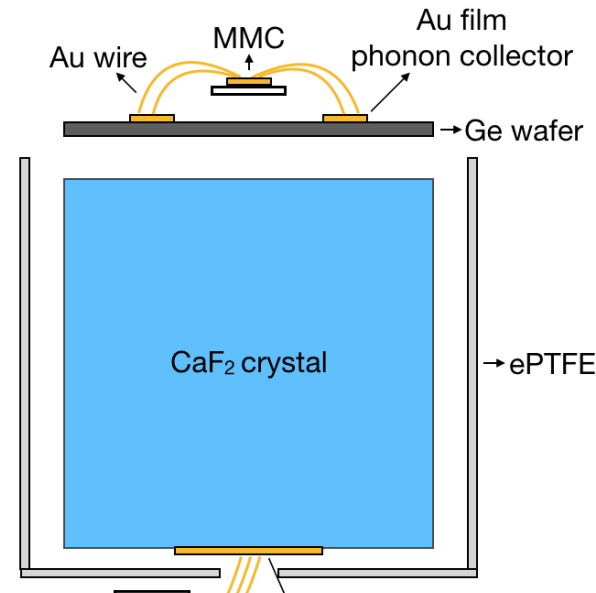
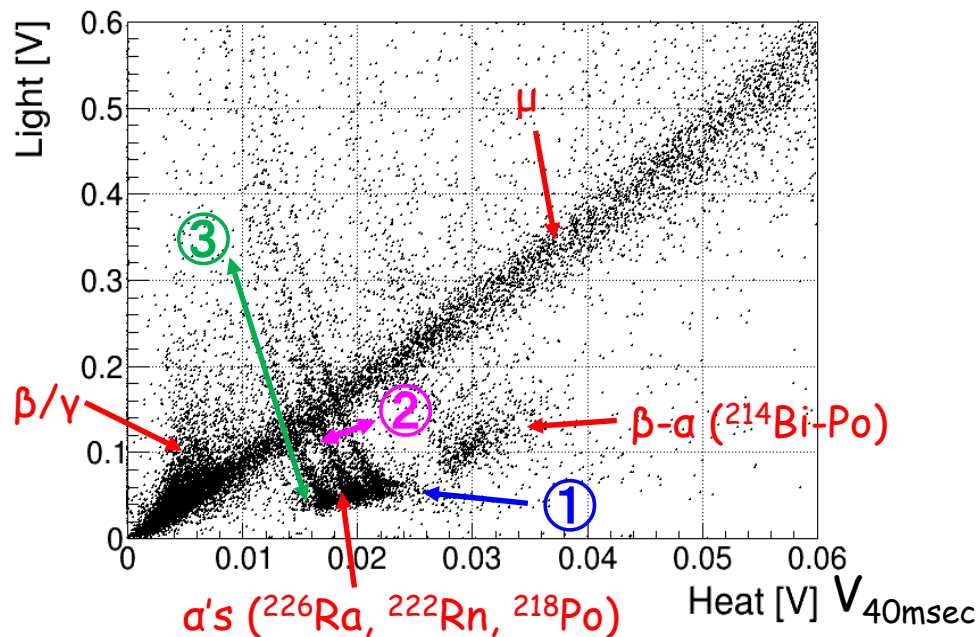
- 現在のEnergy測定原理(シンチレータ)では分解能の大幅な改善は不可能
 $\rightarrow$ ボロメータ開発への挑戦

CaF₂(pure) Scintillating Bolometer

A02報告で少し詳しく

- First Challenge using CaF₂(pure) and MMC

U系列(²²⁶Ra)の不純物が多い結晶を使用



● 問題点

- ① CaF₂(pure)の発光：UV

Au蒸着膜(Phononコレクター)に光が吸収される ← 補正可能

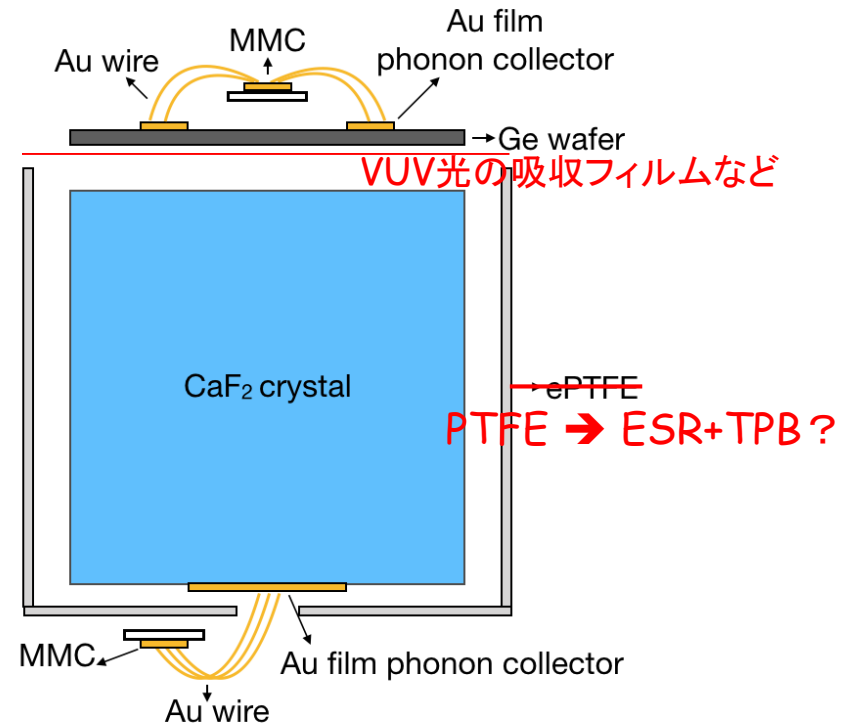
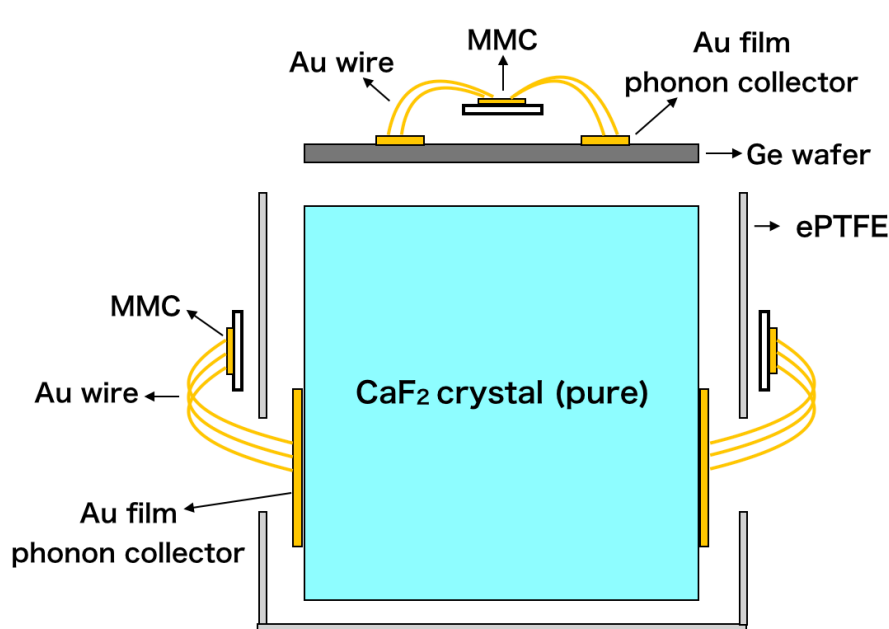
- ② エネルギー分解能があまり良くない ← 反応位置の依存性 (ΔE=0.18%まで改善可)

- ③ Light信号が広く分布(～10倍以上に広がる) ← CaF₂シンチレータのVUV発光が原因

「第7回極低放射能技術研究会」にて報告

今後のCaF₂+MMC検出器の開発

- CaF₂(pure) scintillating bolometerのエネルギー分解能改善
 - 場所依存性を取り除くことができれば、エネルギー分解能を改善可能
 - 多地点読み出し(左図:2点読み出し)
 - ➔ 多地点MMC読み出し:立ち上がりが早いのでMulti-Site事象同定可?
- 粒子同定 CaF₂(pure) 結晶
 - 短波長の蛍光対策



強磁場空洞の開発

暗黒物質探索実験の高感度化

分担者: 岸本(東北大)

● 探索範囲の拡大

● 有力候補「Axion」の探索

- Strong-CP問題

両問題を一気に解決できる魅力的な候補！

- 暗黒物質問題

● 暗黒物質「Axion / ALP」の探索技術の開発

- 冷却強磁場 (9T)

- 空洞のQ値: 高純度素材の利用が重要 ← 低BG素材のノウハウが有用

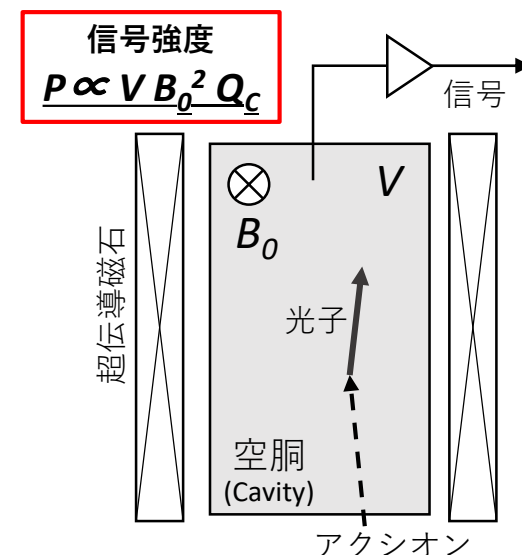
- 共通するマイクロ波計測技術(超伝導素子の読み出し)

計画班内での連携(開発スピードアップ+技術の相互供与)

現実的には $Q_c \sim 10^{+5}$

理想的には $Q_c \sim 10^{+6}$ ← 最終目標

暗黒物質の探索質量領域・有力候補を
網羅できる体制作りと技術開発



アクシオン検出器の原理

強磁場空洞の開発

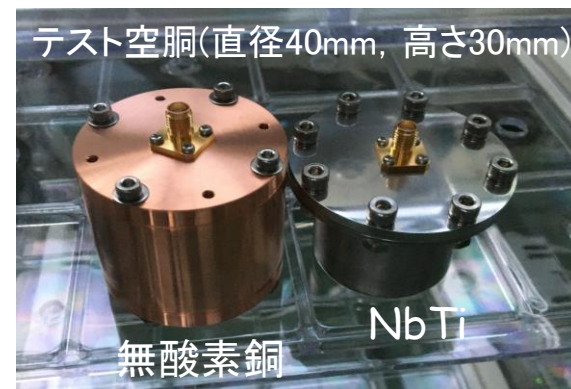
超伝導マグネットの導入(2019年度末導入完了)

- 磁場性能
 - 最大磁場: $B = 9\text{T}$
 - 一様性: $10\% / \Phi 100 \times L200\text{ mm}$
- 冷却性能
 - キャビティ空間: $\Phi 110\text{ mm}$ 以上 $\times L200\text{ mm}$
 - キャビティ空間温度: 4.2 K 以下
 - 冷凍機能力: 1.0 W 以上@ 4.2 K
 - 冷却方式: 熱交換ガス(Heガス)



空洞開発の進捗

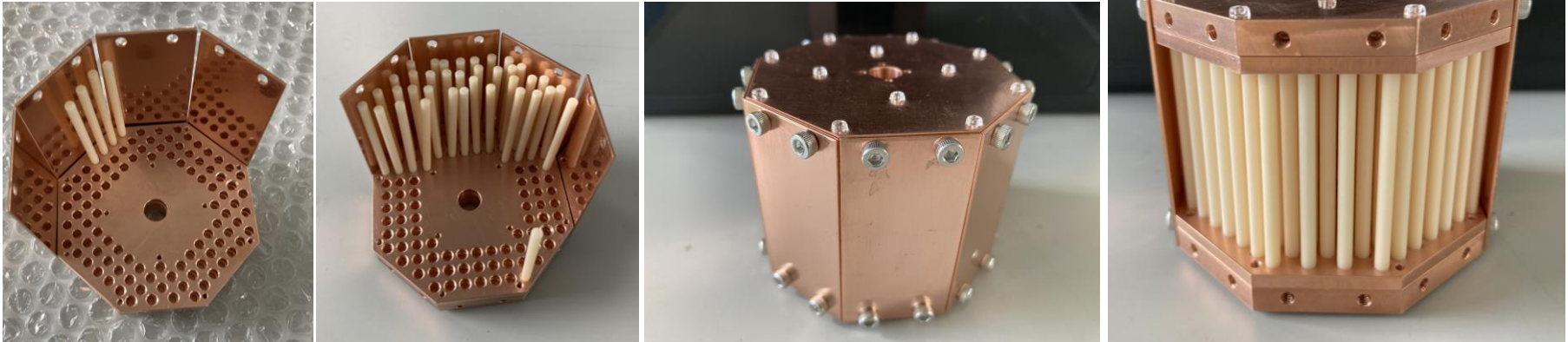
- NbTiのバルク空洞
 - $Q_0 = 8.2 \times 10^4$ (磁場無し的环境下)
- 無酸素銅にNbTi薄膜 磁場と平行な薄膜では磁場の影響が最小限のはず
 - ← 先行研究では、 $Q_0 = 4.5 \times 10^5$
@ (9 GHz , $B = 2\text{ T}$, $T = 4\text{ K}$)
 - コロナの影響で薄膜生成に遅れが生じたが、5月から理研でのNbTi薄膜の施工へ向けた準備を再開
 - 新たに、東北大 材料科学高等研(AIMR)と様々な超伝導体の成膜の可能性について相談中



強磁場空洞の開発

- 低誘電損失材料を用いた空洞
 - サファイヤなどは、特に低温において誘電損失が極めて小さい
 - 低誘電損失材を用いて、High-Q 空洞の作成に挑戦
 - 原理: 低誘電損失材の周期構造で、電磁場の禁制帯を作り出す(フォトリックアシスト 空洞)

アルミナ棒で作った試作 (組み立て→完成品)



常温で $Q_0 = 8.2 \times 10^4$ (期待値は 10^4 オーダー) → 原因調査+材料開発

- 材料開発
 - 高純度サファイヤ結晶を用いて性能向上を計画
 - D01黒澤さん(金属材料研)の協力
 - 高純度セラミックスの合成 → 誘電率測定
 - 東北大学際科学フロンティア研究所 領域創生研究プログラムへ課題申請
 - 岸本+黒澤+小川(福井大工)+今野(東北大工)

まとめ

- D02班: 極低温技術による宇宙素粒子研究の高感度化
 - 共通インフラの整備が進んでいる → 測定も実施可能になってきている
 - 領域内外との積極的な連携＋波及(新しい研究テーマの創出)
- $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索の高感度化
 - 極低温下でのBolometric手法 → 目標: エネルギー分解能 20 keV @Q値
 - CaF_2 (Pure) Scintillating-Bolometer開発
 - CaF_2 結晶からは、VUV発光がある。(← 早稲田大学の協力) かつ、低温では、UV光に対して10倍?
 - 位置依存性を積極的に利用 ← Position再構成、多地点事象識別?
- 強磁場空洞の開発 → High-QでAxion探索へ(原理検証)
 - 超伝導(薄膜)素材を用いた空洞開発
 - 低誘電損失材料を用いたフォトニック空洞開発
 - 素材を共同開発