

極低温技術による 宇宙素粒子研究の高感度化

吉田 齊

*Department of Physics, Osaka
University*

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」

領域研究会2019

2019年8月24、25日 @ 大阪大学豊中キャンパス

計画研究D02

極低温技術による宇宙素粒子研究の高感度化

● メンバー

● 【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】：3名

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

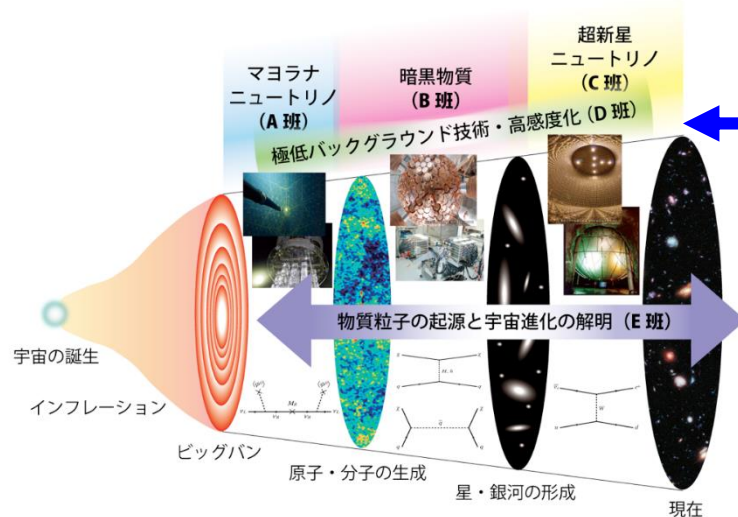
美馬 寛（理化学研究所）：超伝導センサー、計測技術開発

新学術「地下素核」からの発展

地下素核研究

共通技術基盤：極低放射能技術

地下実験室における超稀事象探索の研究の高感度化



大きな成果

- Rn測定・除去
- スクリーニング (HPGe検出器)
- 中性子測定・モニタリング
- 新分析手法

「地下宇宙」でも発展・継続

D01班:極低放射能技術の最先端宇宙素粒子研究への応用

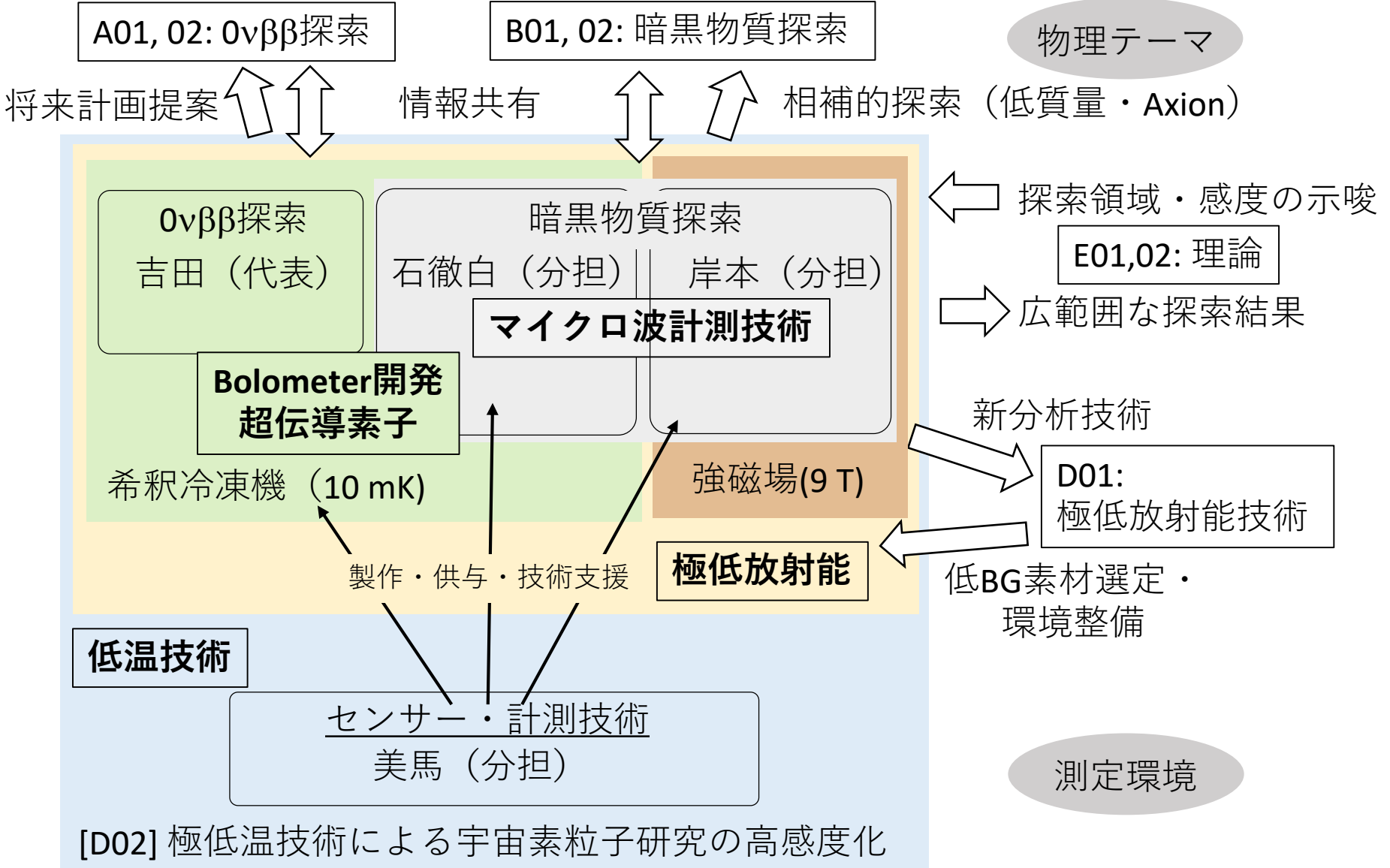
地下宇宙研究

共通技術基盤：極低温技術

- さらなる高感度化 → 極低温技術を取り入れる
- 極低温環境で利用できる技術 → 超伝導技術
- 低温・超伝導センサー、強磁場空洞 → 物理課題への応用・展開

D02班:極低温技術による宇宙素粒子研究の高感度化

新学術領域内での連携



研究目的・手法

● 研究目的

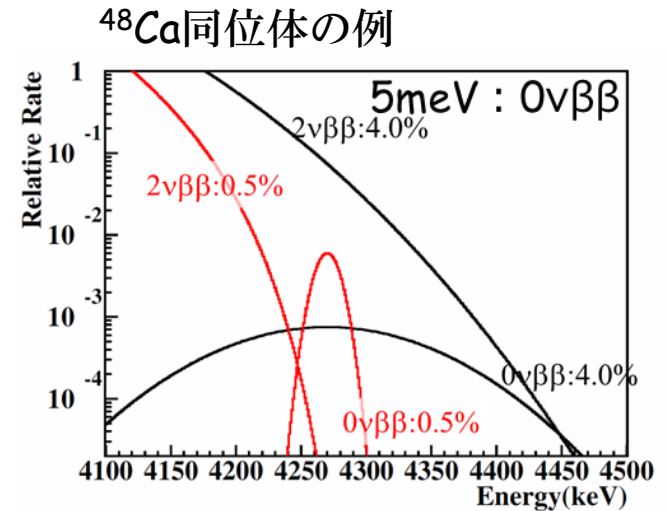
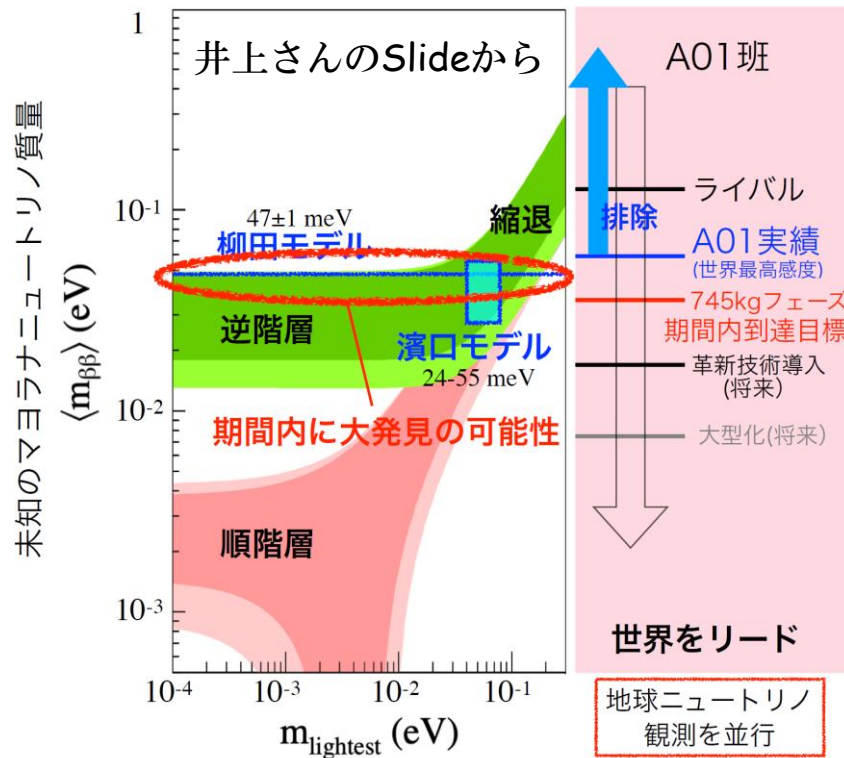
- 極低温下での温度上昇を利用するScintillating-Bolometerを開発し、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊の $Q_{\beta\beta}$ 値(2~4MeV)領域でエネルギー分解能20 keV以下を実現する。
- 低質量WIMPsの探索を目的として、エネルギーしきい値10 eV以下の超伝導検出器を実現する。
- アクシオン探索への利用を目的に、超伝導強磁場共振空洞の開発を行い、通常よりも2桁以上高い共振空洞の増幅度(Q_c 値)を実現する。

● 共通のインフラ整備・計画班での連携

- 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
- 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。
- 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

$0\nu\beta\beta$ 探索実験（A班）の高感度化

● A班: マヨラナ性の検証

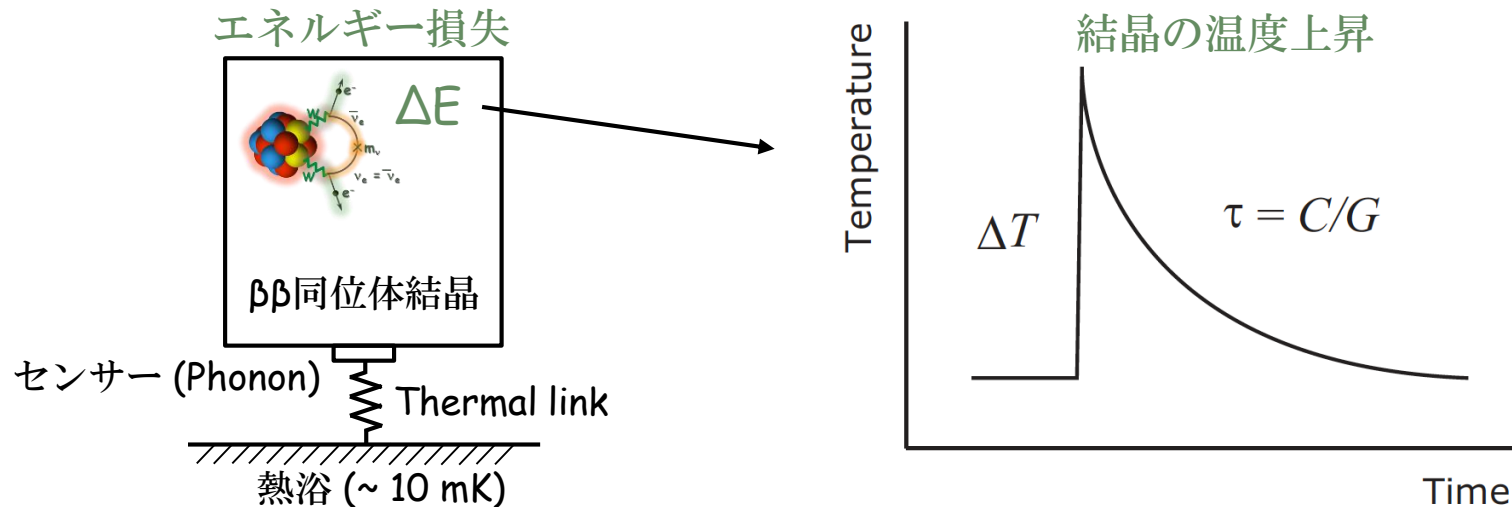


● Inverted階層 $\rightarrow$ Normal階層領域の探索

- 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

Bolometer (熱量計)



● Bolometer (熱量放射線検出器) の原理

- Target($\beta\beta$ 同位体、暗黒物質散乱体) 結晶を極低温 (~ 10mK) に冷却
 - 【例】 2 cmの立方体(~ 30 g)の CaF_2 のQ値(4.27MeV)での温度上昇は~ 140 [mK] @ 10mK
- センサーで温度上昇を測定 → エネルギーの測定
- 高いエネルギー分解能、大きい信号が期待できる (ノイズで制限)

● 温度を測定する センサーの選択肢

本研究で全て実施(センサーの多様化)

- R-変化
 - Thermistors (NTD Ge)
 - TES (Transition Edge Sensor)
- 磁化変化
 - MMC (Metallic Magnetic Calorimeter)
- L-変化
 - KID (Kinetic Inductance Device)

CUORE, CUPID (some options), 大阪
Light detector, CRESST
AMoRE(共同研究), LIMINEU
CALDER, 石徹白 (東北大)

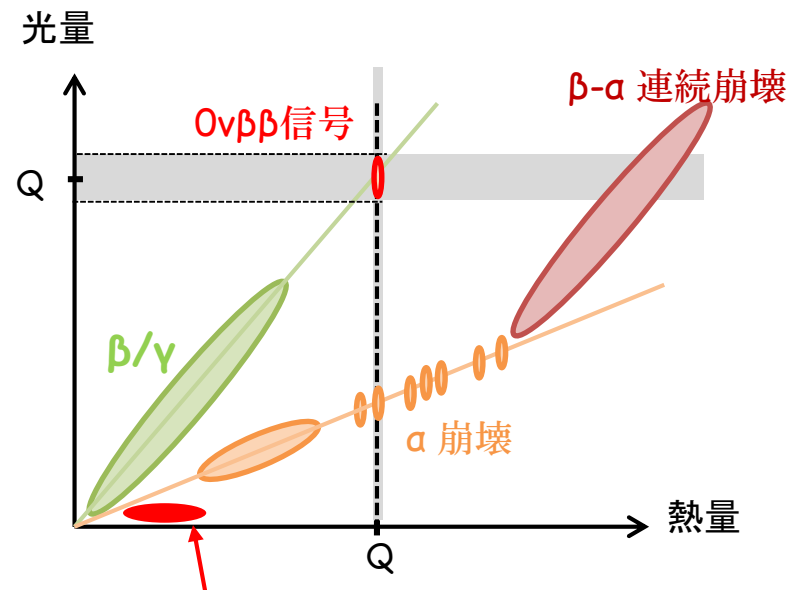
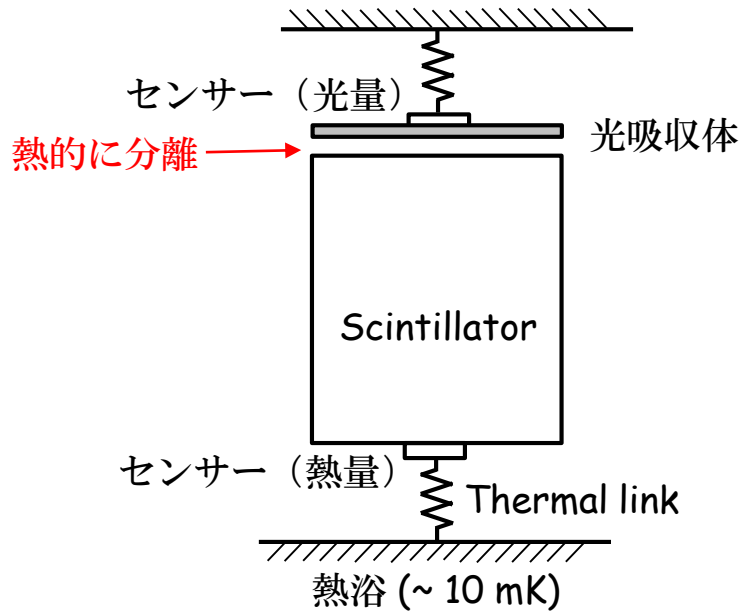
超伝導センサー

Scintillating Bolometer(蛍光熱量計)

● BG低減化への応用

- 技術的には、実用化されている

CRESST-II (CaWO_4), LUMINEU, Lucifer, CUPID(ZnSe), AMoRE (Li,CaMoO_4), など

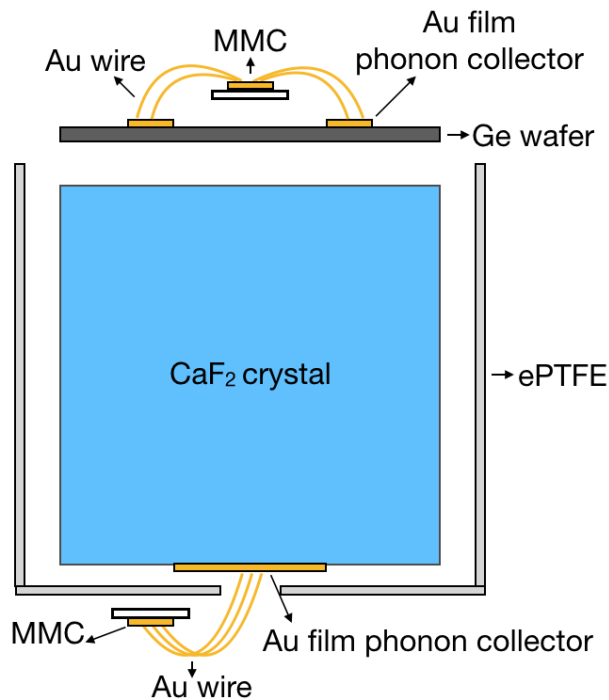


ここにWIMPs散乱が見える！

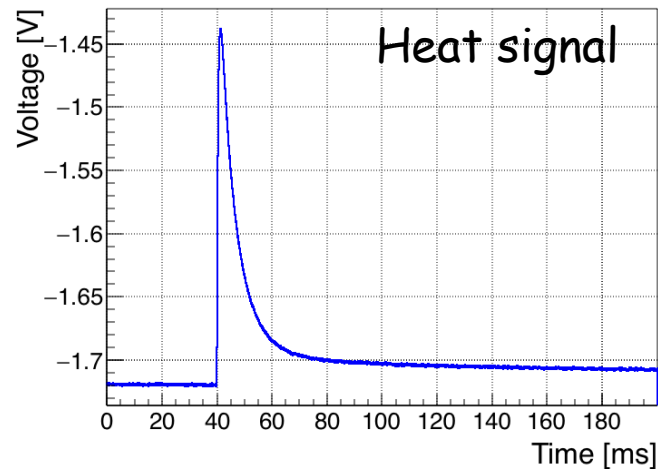
- 熱量に加え、蛍光量も同時に測定することで、蛍光の重粒子線クエンチング効果を用いた重粒子/ β - γ 粒子識別を行う → 低BG化
 - 主なBackgroundである α , β - α 崩壊事象を排除可能
 - α 線を同定することで、TagできるBGは多い

CaF₂ Scintillating-Bolometer開発

- 韓国IBSグループとの共同研究開発
 - Sub-Group of CANDLES & AMoRE (Yong-Hamb Kim et. al.)
 - 世界初のCaF₂(pure) Scintillating-Bolometerの実現
 - Sensor : MMC (Metallic Magnetic Calorimeter)

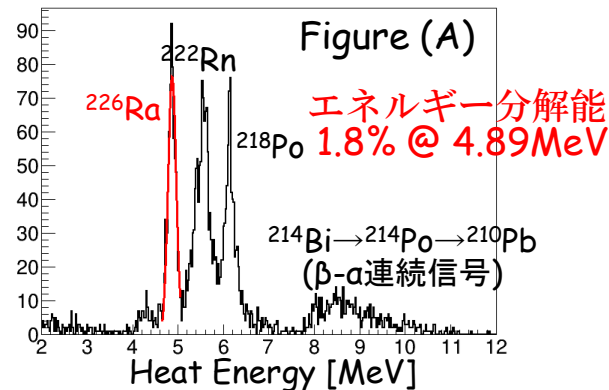
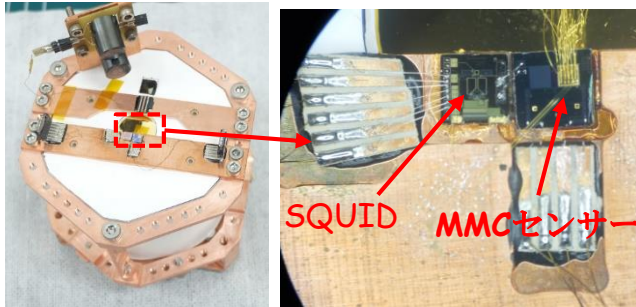


- Crystal: CaF₂(pure)
 - Volume: 312g (5cm ϕ ×5cm)
 - Emission peak : 280nm
 - Light output: 25,000 photons/MeV

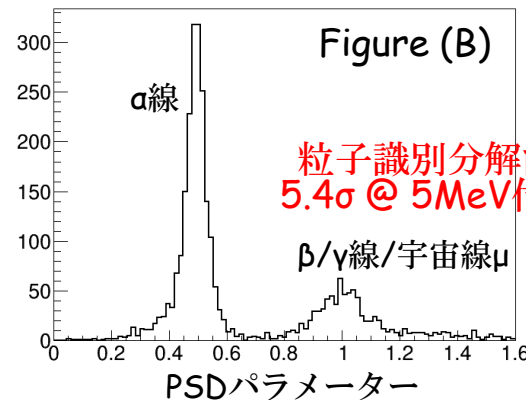
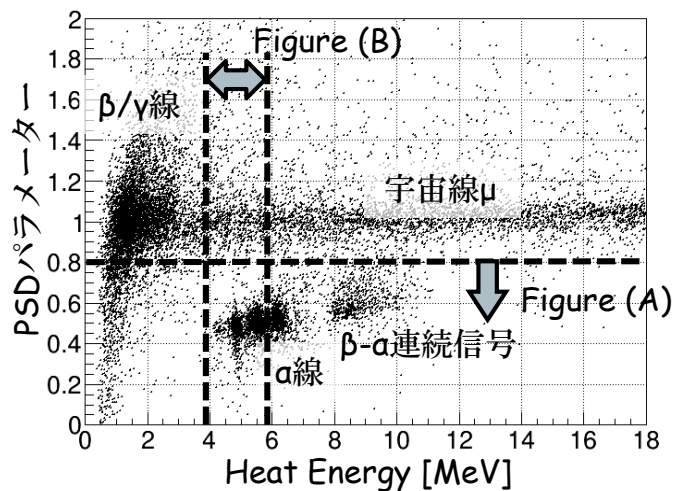


Scintillating-Bolometer開発

CaF₂ 蛍光熱量計



エネルギー分解能
0.42% @ 5.5MeV
w/o 位置依存性



● CaF₂ Scintillating-Bolometerの今後の課題

- エネルギー分解能 (熱量信号の位置依存性が大きい) → 構造改良
- 引き続き本研究課題で、韓国グループと共同研究 (国際活動支援班)
- 他センサーでの測定 (NTD-Geサーミスター@大阪)

Scintillating-Bolometerの開発計画

- R&D in 大阪大学

- $\text{CaF}_2 + \text{NTD-Ge}$ Scinti-Bolometer開発
- 希釈冷凍機が稼働中
 - $\sim 10\text{mK}$ @ MC
- NTD-GeサーミスターのR-T特性を測定中

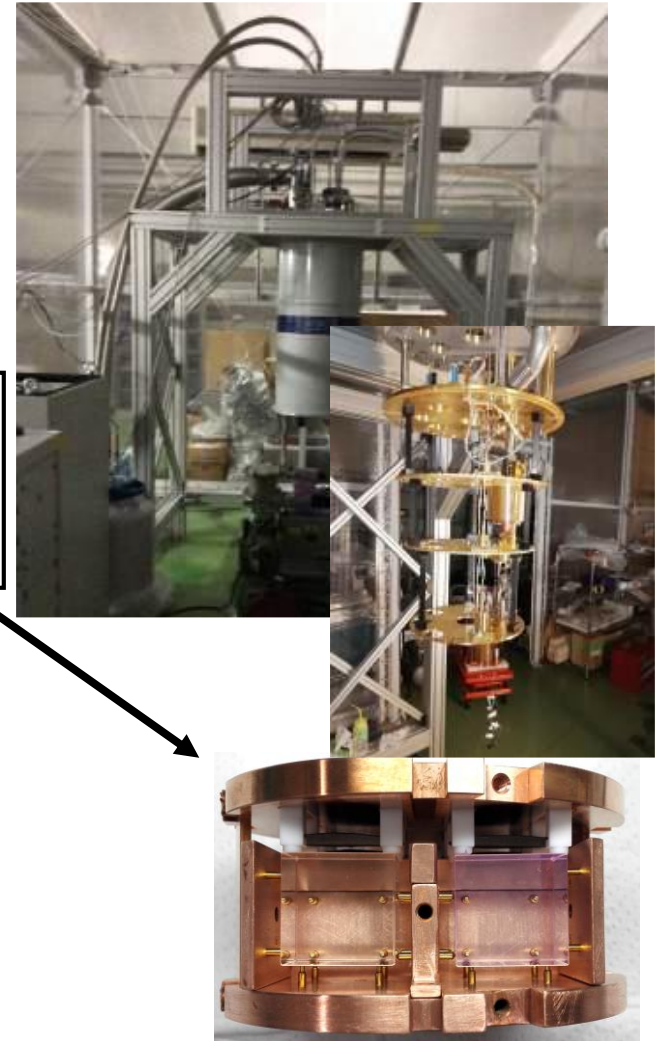
- **CaF₂ crystal**: $20 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$.
- **HPGe wafer**: $22\text{mm } \Phi$, $200\mu\text{m}$ thickness, purity 13N
- **Reflector**: diffuse reflection $\Rightarrow$ Teflon sheet
specular reflection $\Rightarrow$ MIRO-UV

- 多様なセンサー

- NTD-Ge: シンプル $\rightarrow$ 多くの低BG化実績
- MMC: 信号が早い
- TES: ゲイン大、レンジ狭

- 多様な $\beta\beta$ 同位体結晶

- (現在) A02班: CaF_2 結晶
- その他の $\beta\beta$ 核種
 - ^{116}Cd , ^{96}Zr , ^{82}Se , ...
 - 核感度、濃縮の可否、コストなどなど比較

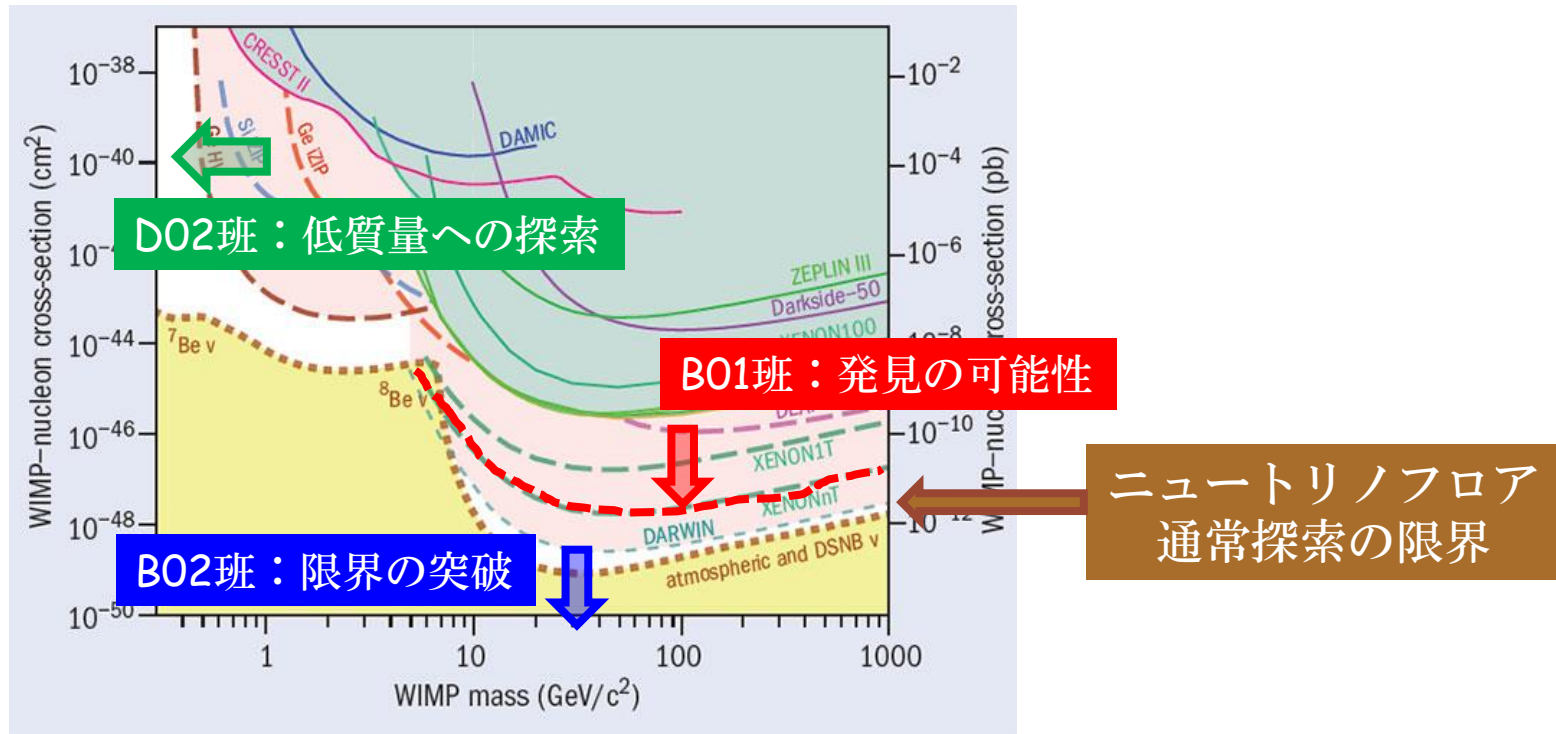


Detector Combination

センサー、結晶の多様化と低BG化

暗黒物質探索実験（B班）の高感度化

- 探索範囲の拡大



- B01班：XENONnT → 世界最高感度の探索
- B02班：方向感度検出器
→ ニュートリノフロア（通常探索の限界）の突破
- 低質量WIMPsの探索 → 低エネルギー信号の検出
 - 超伝導検出器（センサー）技術を使った低エネルギー信号検出

低質量WIMPsの探索の手法

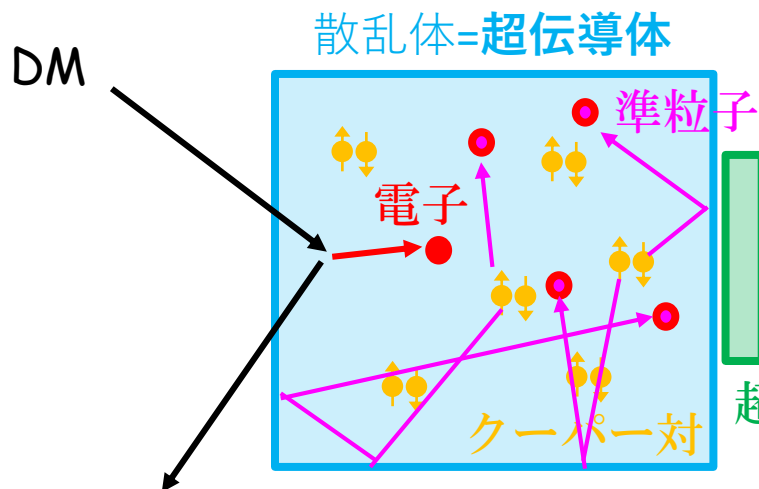
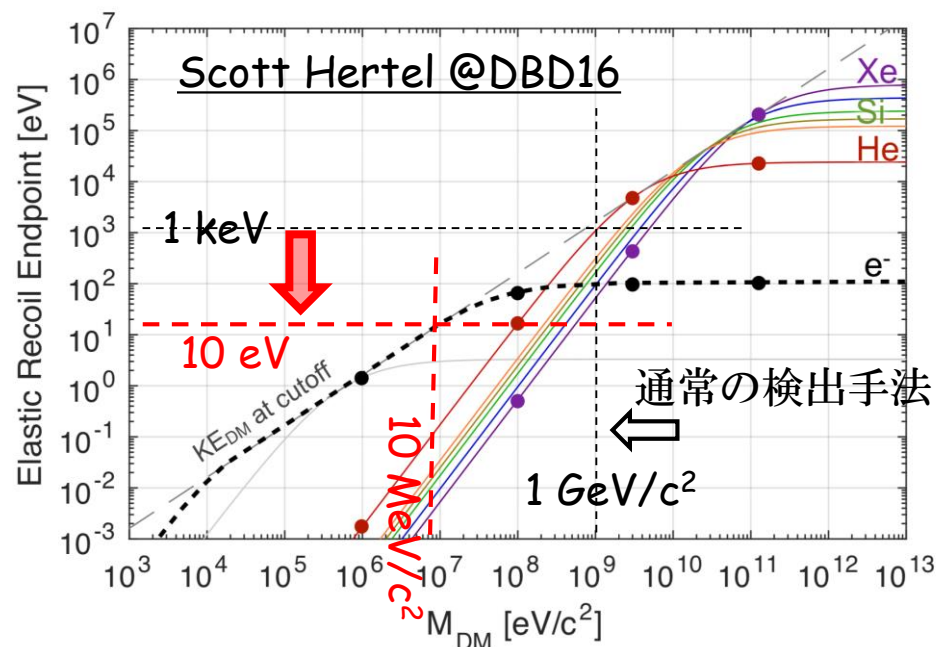
- 低質量WIMPs探索の条件

- 軽い原子核標的 / 電子標的
- 超低エネルギーしきい値

~ eV 信号の検出

- 低エネルギー信号の検出手法

- 極低温でBolometer原理
- 超伝導センサーを利用



反跳エネルギーで準粒子へ解離

クーパー対の解離エネルギー

~ meV

目標：低エネルギーしきい値 ~10 eV以下

低質量WIMPsの探索の手法

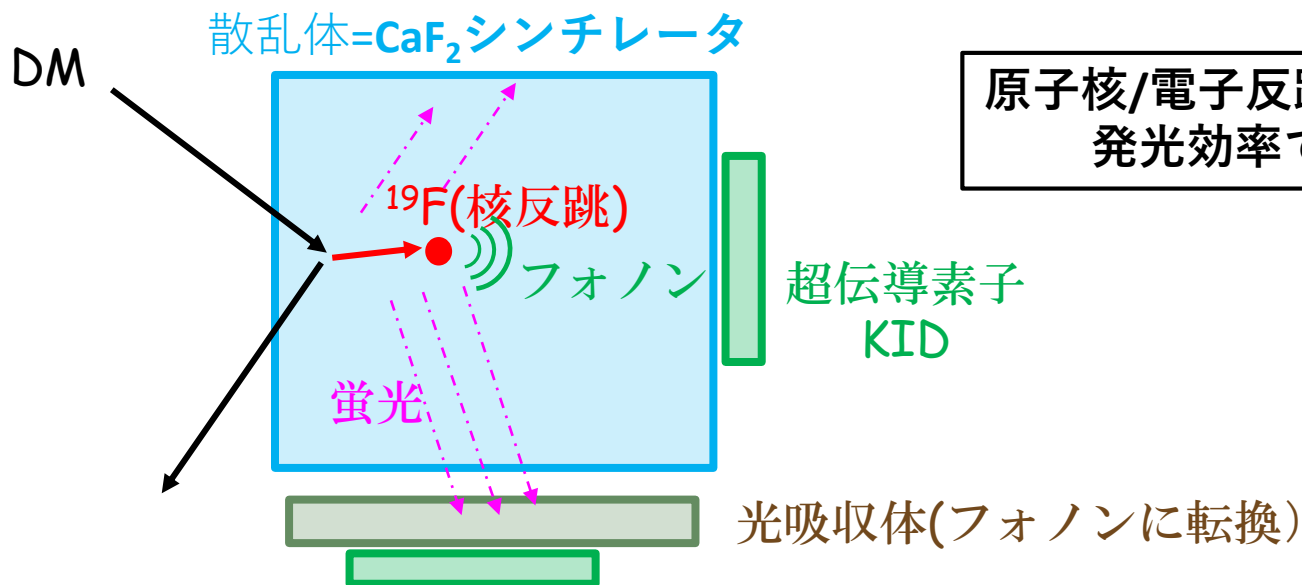
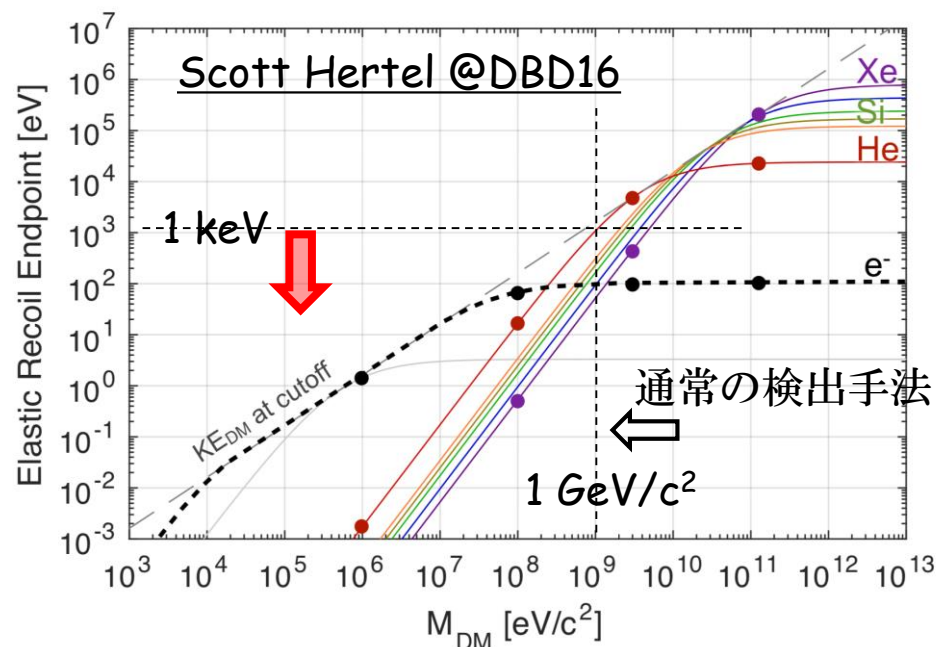
- 低質量WIMPs探索の条件

- 軽い原子核標的 / 電子標的
- 超低エネルギーしきい値

~ eV 信号の検出

- 低エネルギー信号の検出手法

- 極低温でBolometer原理
- 超伝導センサーを利用



原子核/電子反跳の信号を
発光効率で分離

Bolometer with KID on CaF_2

石徹白（東北大）

● 目標

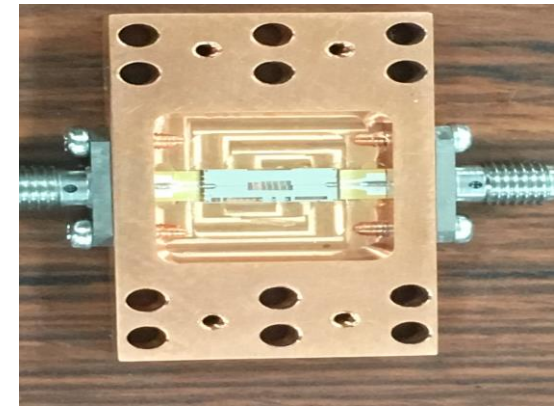
- 質量MeV領域の低質量WIMPの探索手法の確立

● 研究手法

- 基盤をWIMPs標的とする（直接的な信号検出）
- Si基盤 → CaF_2 基盤
 - 19-F：SD-WIMPs標的として
 - Scintillating-Bolometerへの発展
- Al標的 → 目標：エネルギーしきい値 $\sim 10 \text{ eV}$

● 現在の状況

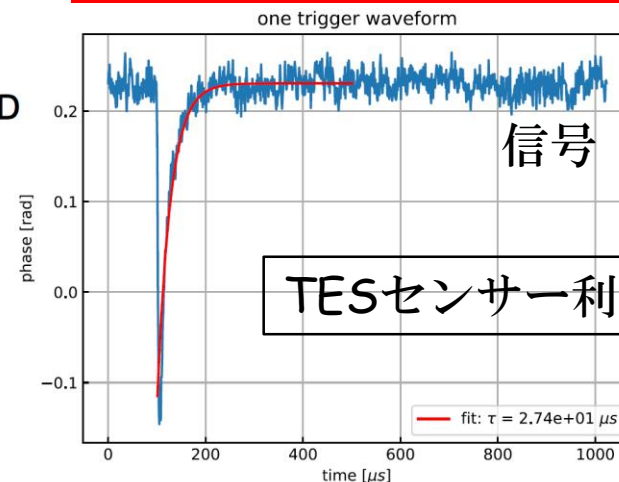
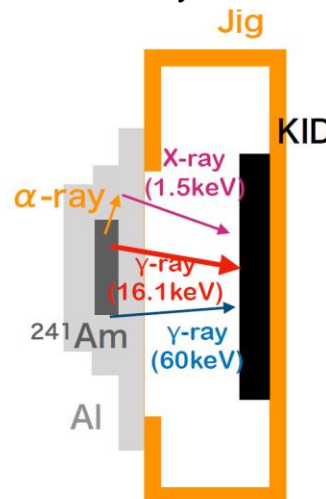
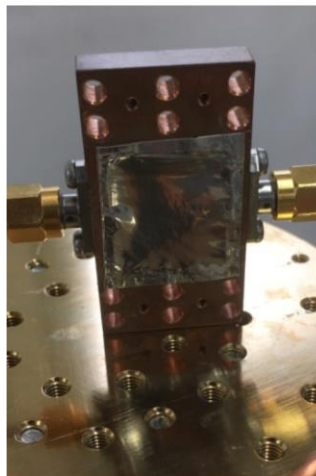
- CaF_2 基板上のKIDの動作確認完了 → 信号検出
- エネルギースペクトル（分解能、しきい値の評価）
- KIDのノイズ解析（磁場、振動など）



CaF_2 基盤上にプリントされたKID

大型化→多チャンネル化
(本研究課題として取り組む)

センサー、標的の多様化と低BG化



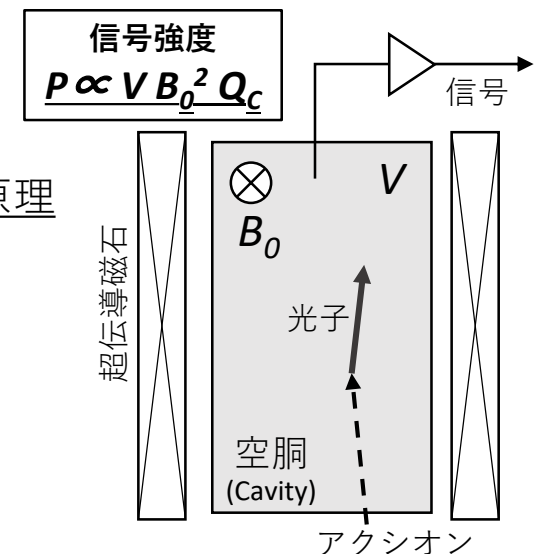
TESセンサー利用も計画

暗黒物質探索実験（B班）の高感度化

岸本（東北大）

- 探索範囲の拡大
 - もう一つの有力候補「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」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）

アクシオン検出器の原理



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

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
 - 低温技術を利用し、領域内研究の高度化
- $0\nu\beta\beta$ 崩壊の高感度化
 - 順階層領域探索のための技術 → エネルギー分解能の飛躍的改良
 - BG ($2\nu\beta\beta$ 事象の染み込み、 ^8B -太陽 ν) の低減
 - 極低温下でのBolometric手法 → 目標：エネルギー分解能 20 keV
 - Scintillating-Bolometer開発
 - 粒子識別能 → BG-freeへ向けて
- 宇宙暗黒物質の探索範囲拡大（低質量WIMPs）
 - 極低温下で超伝導センサーを使用し、低エネルギーしきい値10eVを実現
 - 散乱体として、 CaF_2 やAlを使用
- Axion (ALP) 探索技術の開発
 - 冷却強磁場空洞の開発
 - マイクロ波計測技術の開発
- 低温技術研究会を行います
 - 2020年1月10日～11日@理研
 - 超伝導素子、多重読み出し、冷凍機、超伝導マグネットなどなど
 - 他分野との連携、他分野への波及

参加を歓迎します