

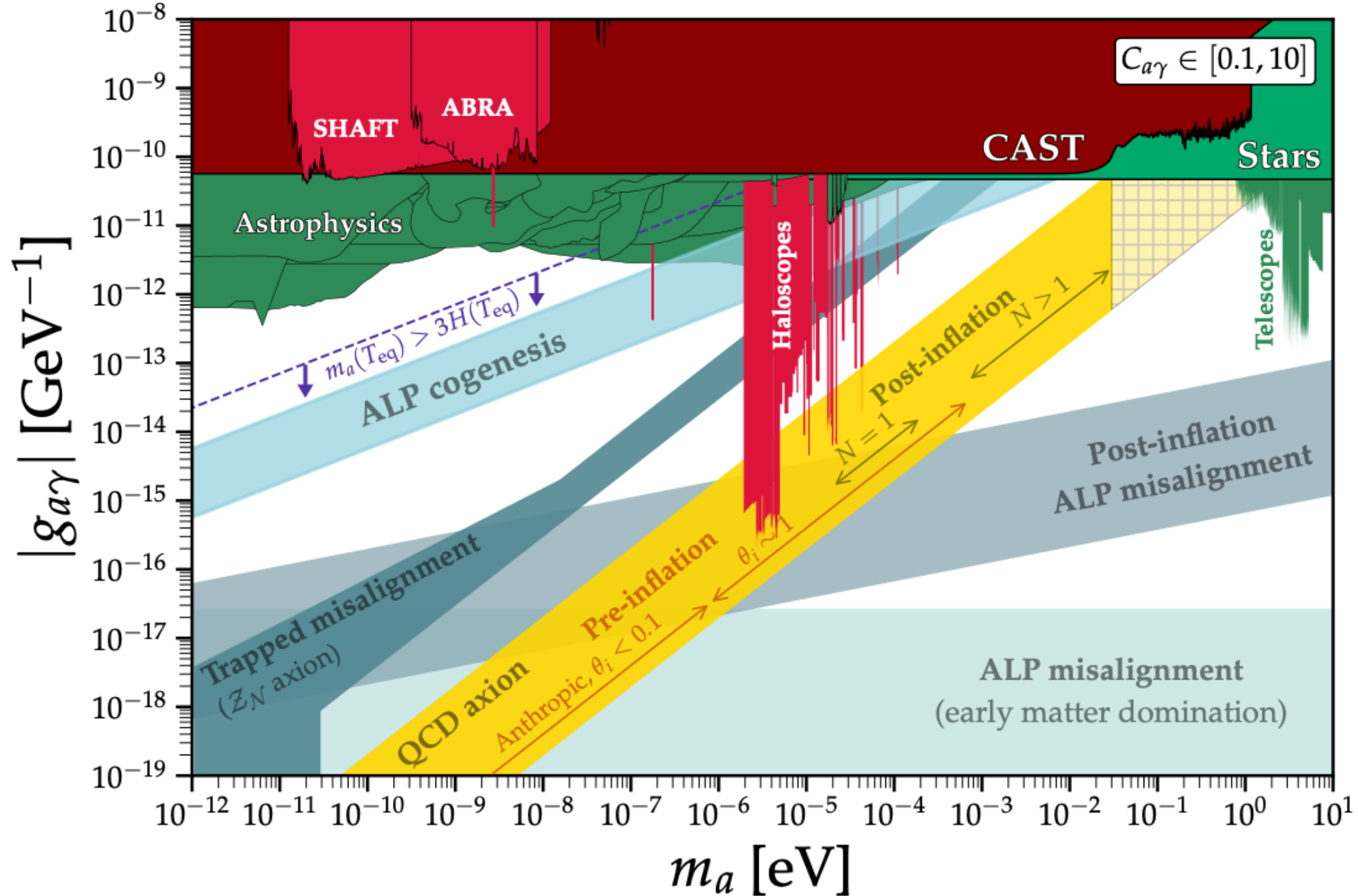
暗黒物質アキシオンの探索

B01：強磁場とマイクロ波・超伝導技術が切り拓く、
暗黒物質アキシオン探索のフロンティア

東北大学 ニュートリノ科学研究センター
岸本 康宏

「地下稀事象」領域研究会，2026年6月25日
東京大学 駒場キャンパス 21MOMCWEST レクチャーホール

DM Axion



EDAMAME Project

Explore DArk matter Mystery though Anomalous Microwave Emission

- **Phase 1** (2024～2028)

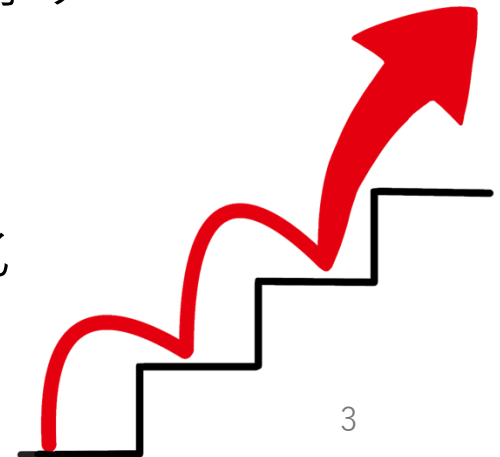
- 既存の技術と装置で，未探索領域を探索する.
- 物理として結果を出しながら，R&Dを進める.

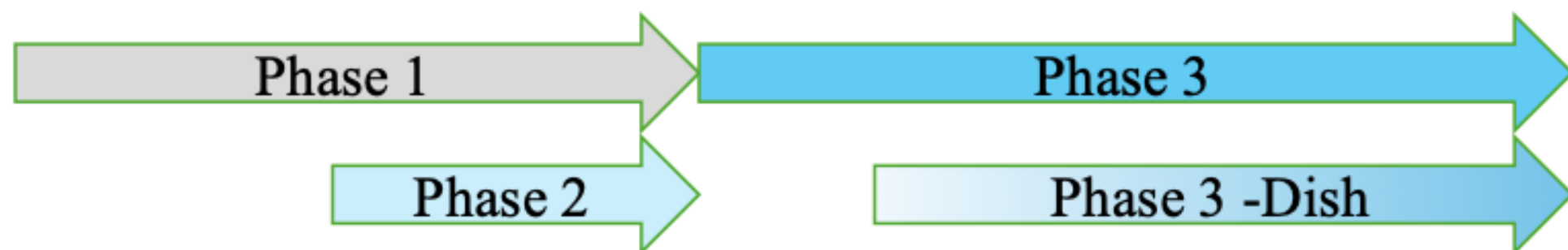
- **Phase 2** (2026～2028) ← ここまでは，学術変革の範囲

- 4つのイノベーションで，KSVZ Axion モデルに肉薄する探索を行う

- **Phase 3** (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
- 広範囲での探索，特により高周波数側の開拓





Phase 1 (On-going)

- RCNS magnet
(9 T, $\varnothing 110$, $L200$)
365 days available
- T=4 K, HEMT amp.
- Cavity haloscope
f=7.5 – 8 GHz (main region)
extend up to 14 GHz

Phase 2

- HFLMS magnet
(9.4 T, $\varnothing 290$, $L220$)
Available 1
month/year
- T=2K, KIPA
- Cavity haloscope
f=7.5 – 8 GHz
(main region)
(Narrow freq. scan region due
to limited operation time.)

Phase 3

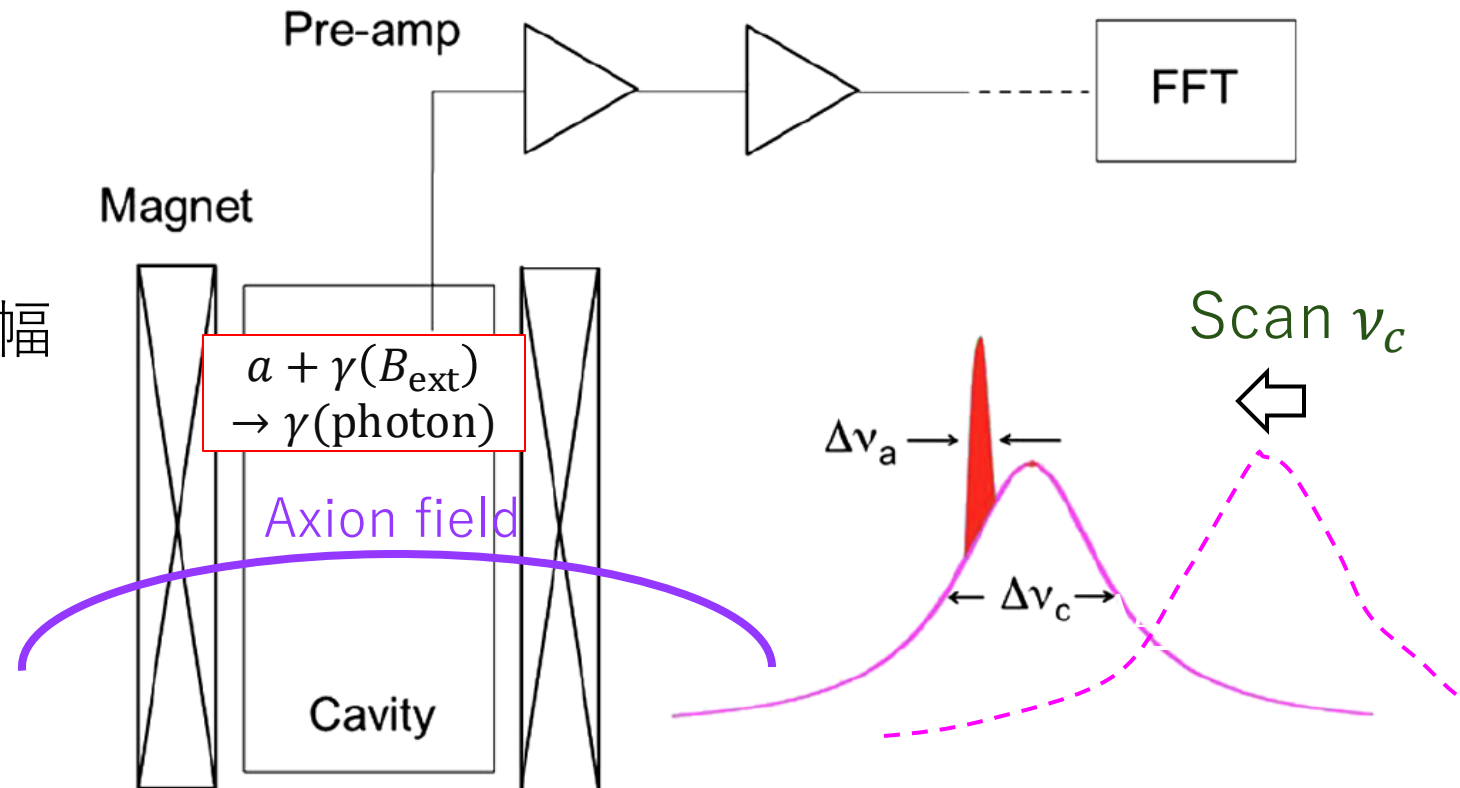
- New strong magnet
(12 T, $\varnothing 600$, $L600$)
365 days available
- T=0.3 K, KIPA
- Cavity haloscope
f=0.35 – 20 GHz

Phase 3 -Dish

- Phase 3 + Dish antenna
f=10 – 1,000 GHz

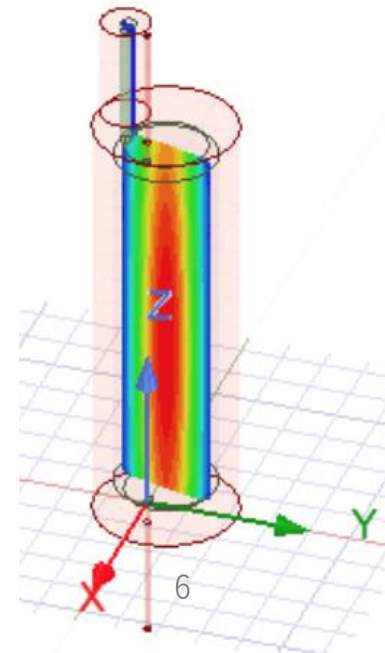
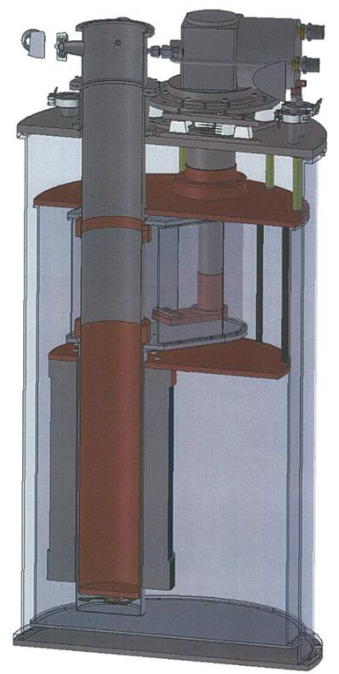
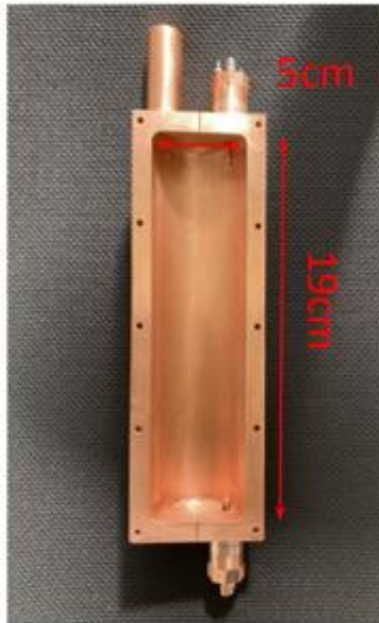
実験原理 (Cavity Haloscope)

- $a + \gamma \rightarrow \gamma$ in resonant cavity
 - $P = \frac{\beta}{1+\beta} G g_{a\gamma\gamma}^2 \frac{\rho V}{m_a} B^2 C_{\ell mp} Q_L$
- 最も高感度
 - 共振器による「信号だけの」増幅
 - 増幅率 $Q_L = 10^{+(4\sim 6)}$

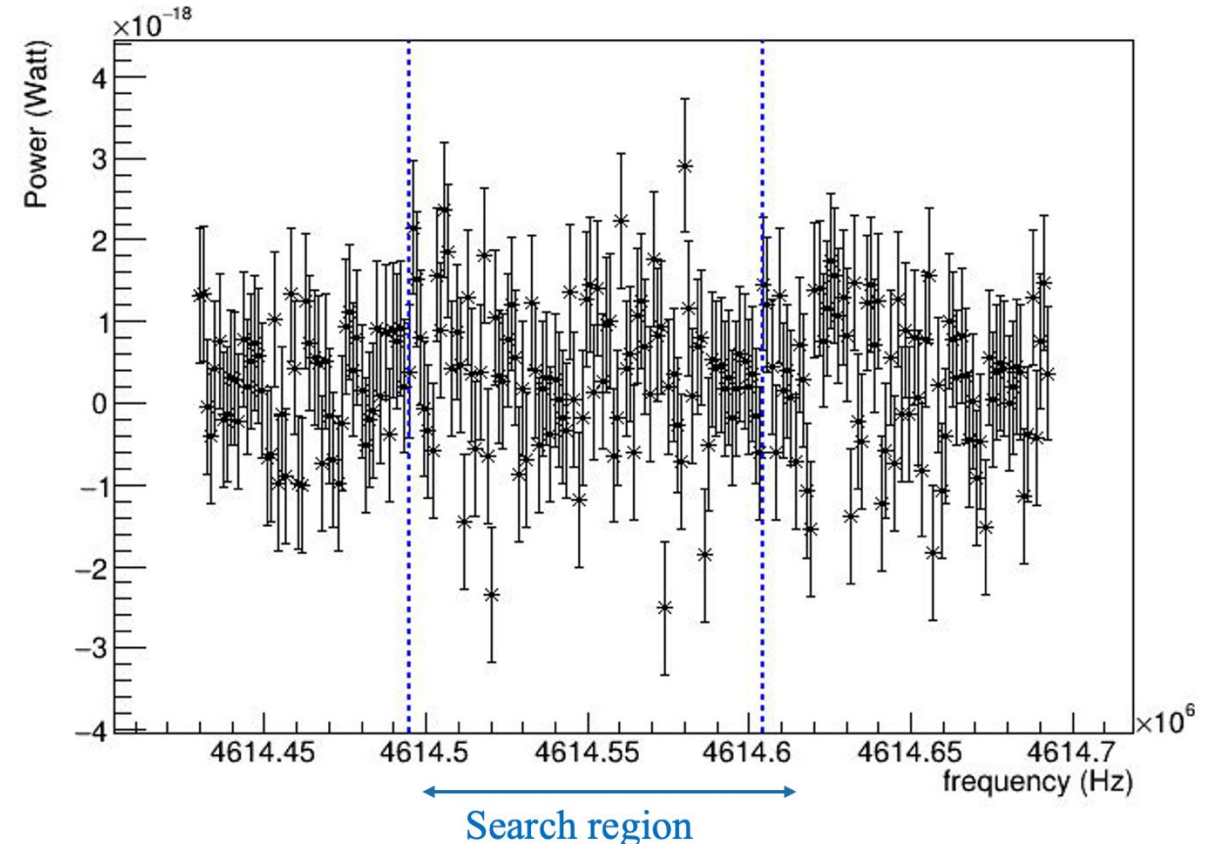
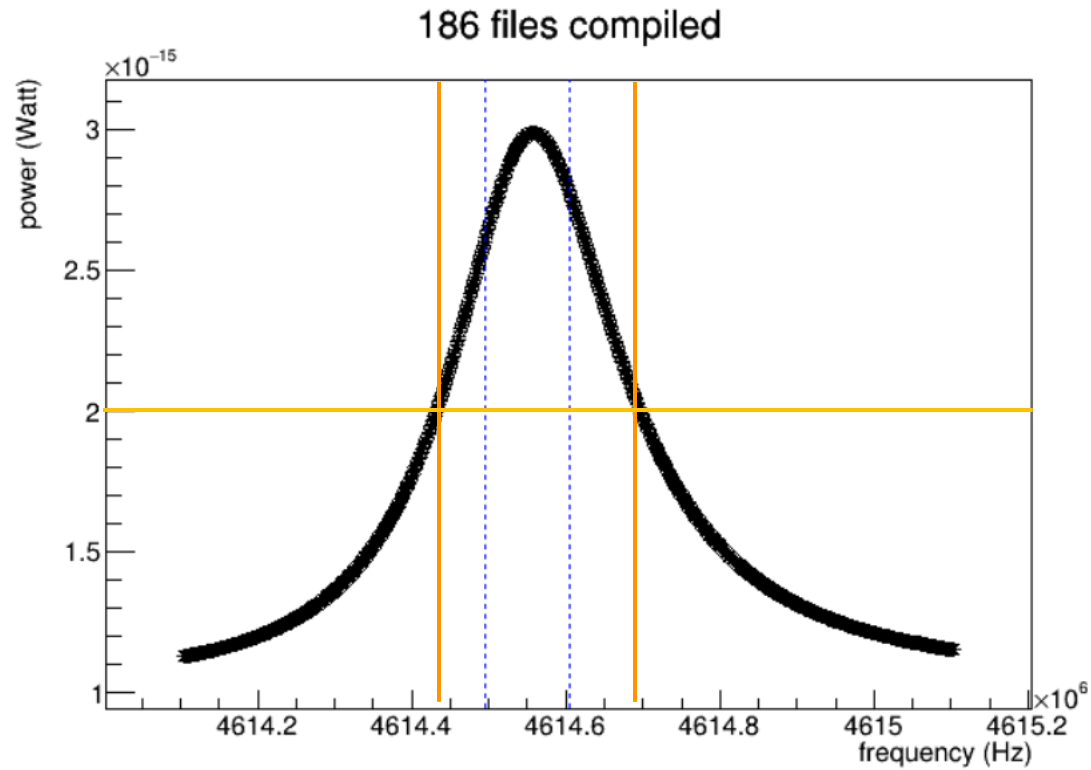


EDAMAME Phase 1 Test (2023~now)

- マグネット
 - 試料室スペース $\phi 110$ mm, L200mm
 - $B_{\text{center}} = 9.0$ T
 - $\Delta B < 10\%$ /試料室
- クライオスタット
 - GM 冷凍機 : 1 W @4.2 K
 - $T = 3.8$ K @ no load



- Actual data



σ of null data sample is considered as error of each data point.

Signal fitting result

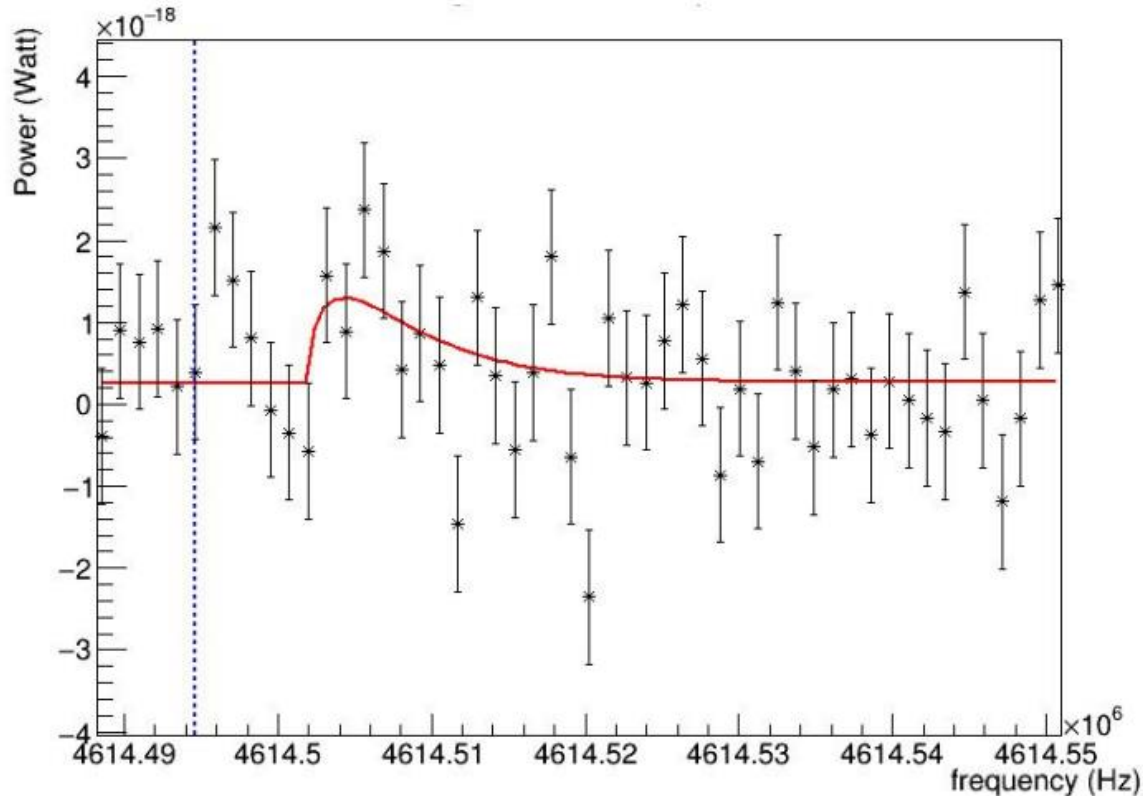
8

$$fit(\nu_i) = \underbrace{p0 + p1(\nu_i - \nu_0)}_{BG} + \underbrace{P \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{\nu_0 \sqrt{\nu_0}} \left(\frac{c}{\sigma}\right)^3 \sqrt{\nu_i - \nu_0} \exp\left\{-\frac{\nu_i - \nu_0}{\nu_0} \left(\frac{c}{\sigma}\right)^2\right\}}_{\text{signal}} \Delta\nu$$

Our best candidate for axion signal

BG

signal

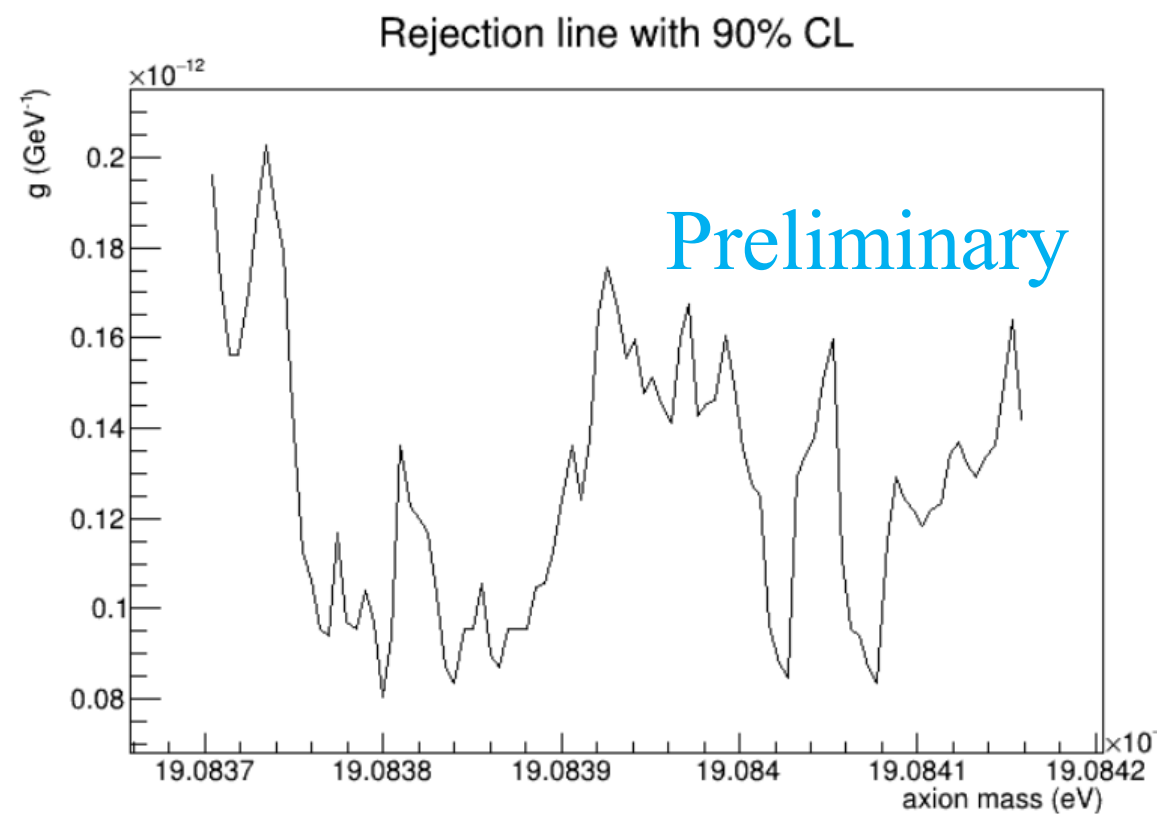


Axion velocity : Maxwell distribution

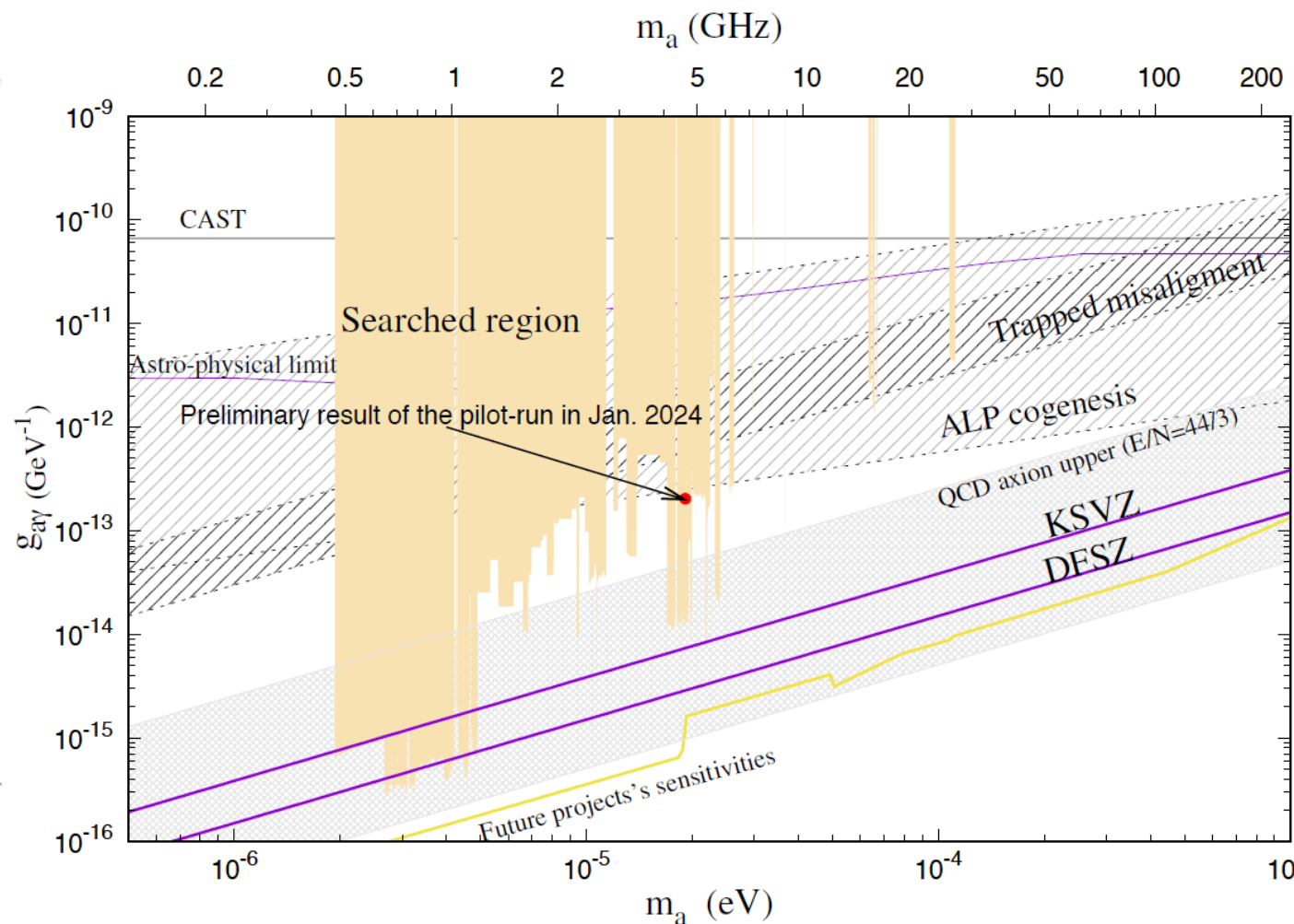
Not statistically significant with
Look-elsewhere effect

Result

9



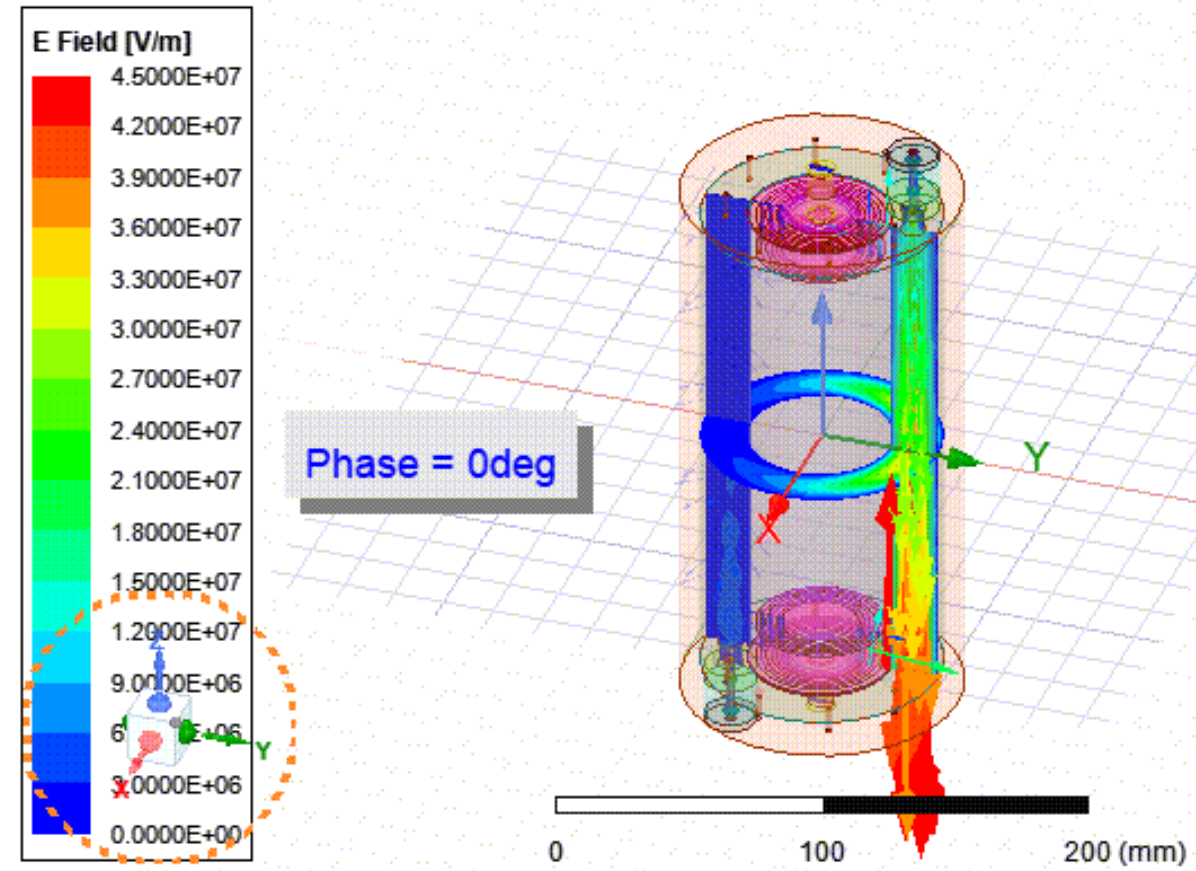
our most stringent upper limit is
 $g_{a\gamma\gamma} = 8 \times 10^{-14} \text{GeV}^{-1}$
at $1.908380 \times 10^{-5} \text{ eV}$



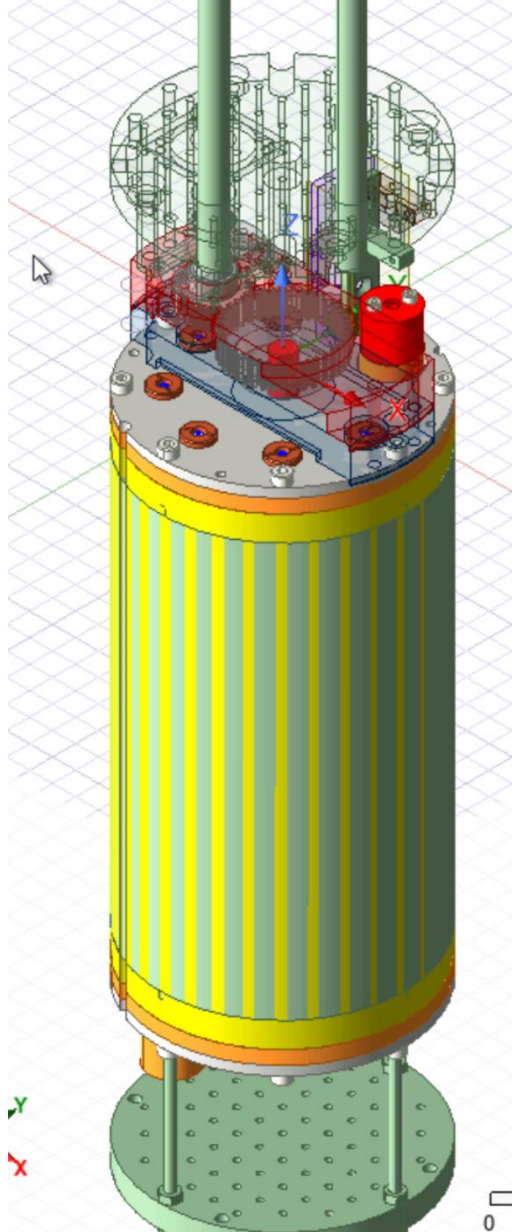
Ref) HAYSTAC
Phase-II arxiv.2409.08998

EDAMAME Phase 1

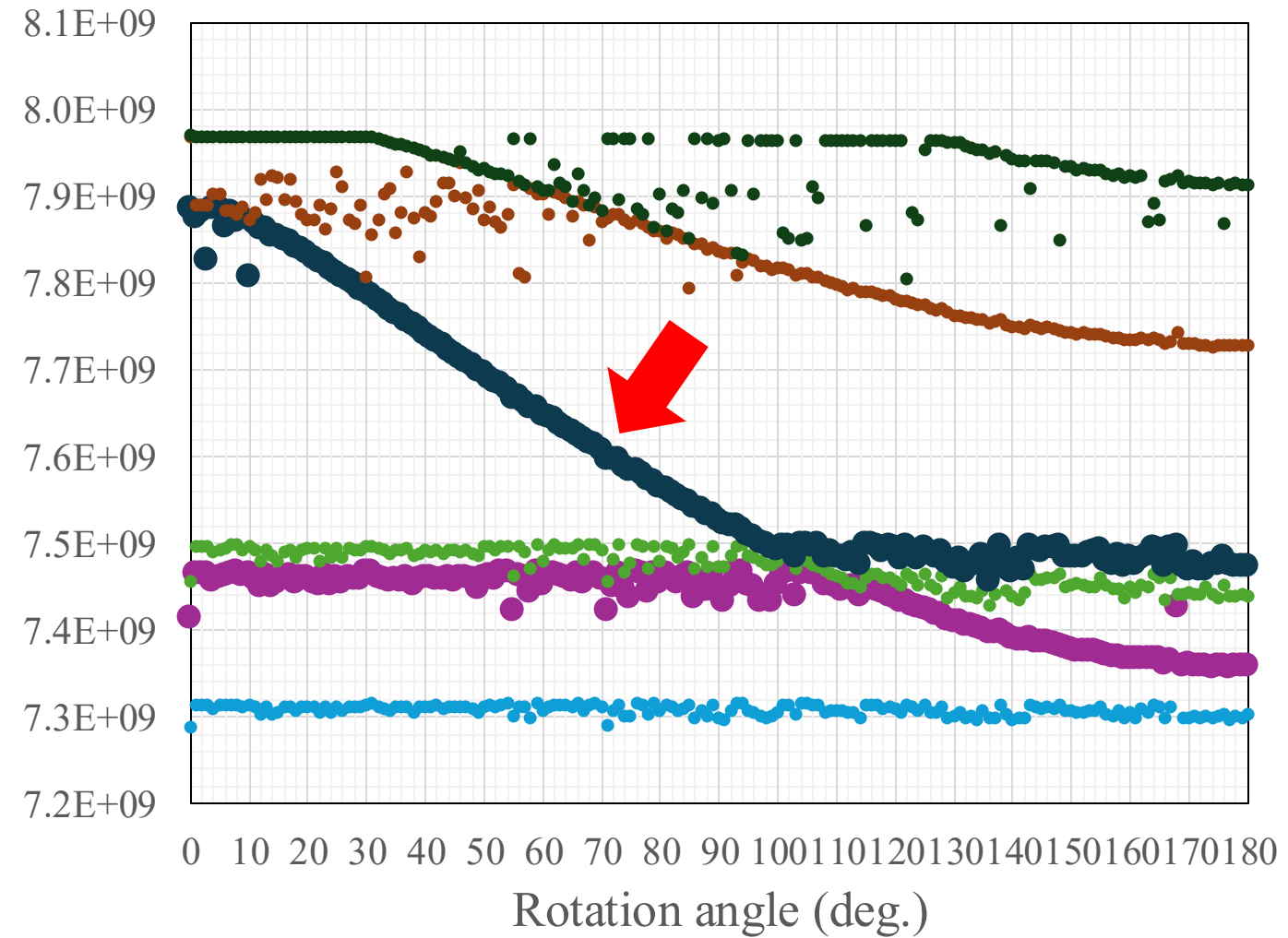
- 高い周波数（**7.35 ~ 7.9 GHz**）から本格的に探索を行う（2025年中に）
 - ドーナツ型空洞
 - 市販の極低ノイズクライオアンプ
 - これまで使っていたもの
 - 現在周辺機器の作図・作成
 - 近々に測定を開始する

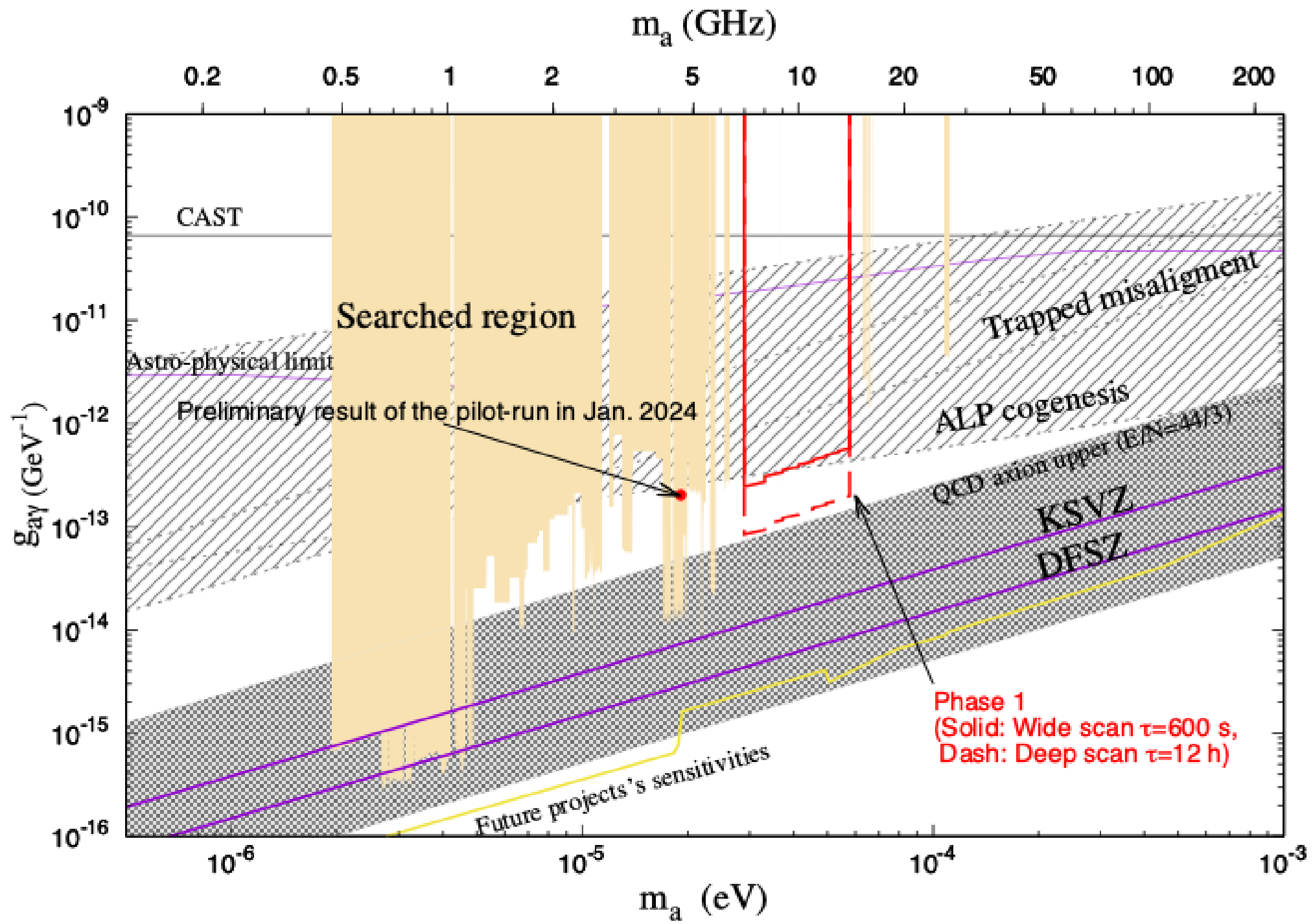


- Torus Cavity



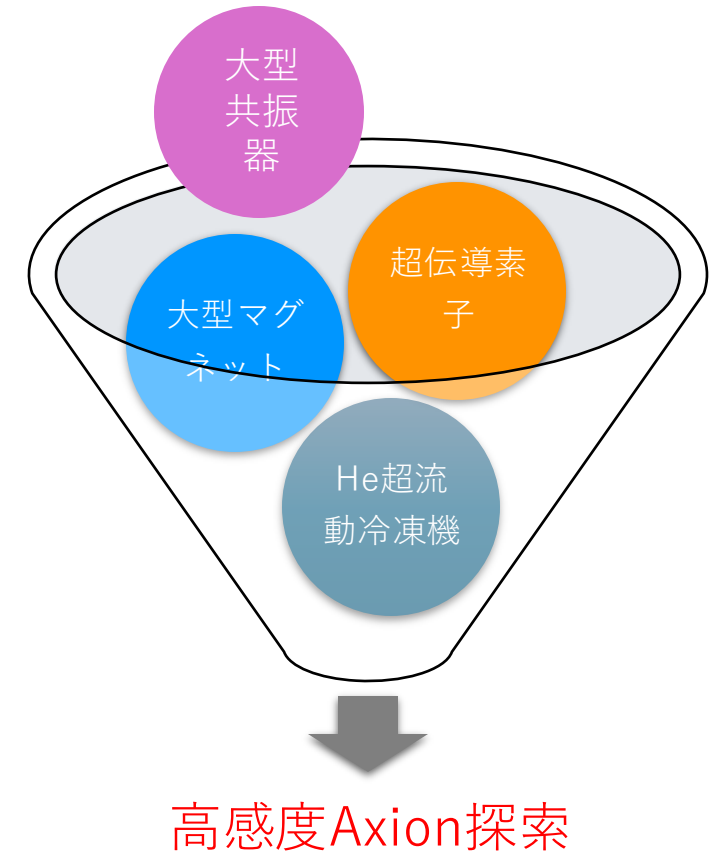
Freq. (Hz)





EDAMAME Phase 2

- 4つの要素を追加して，感度を向上し，QCD Axion領域へ
 - 大型共振空洞によって信号を増強
 - 超伝導素子による低雑音化
 - He超流動冷凍機による低雑音化
 - マグネットサイズを拡大し，信号を増強

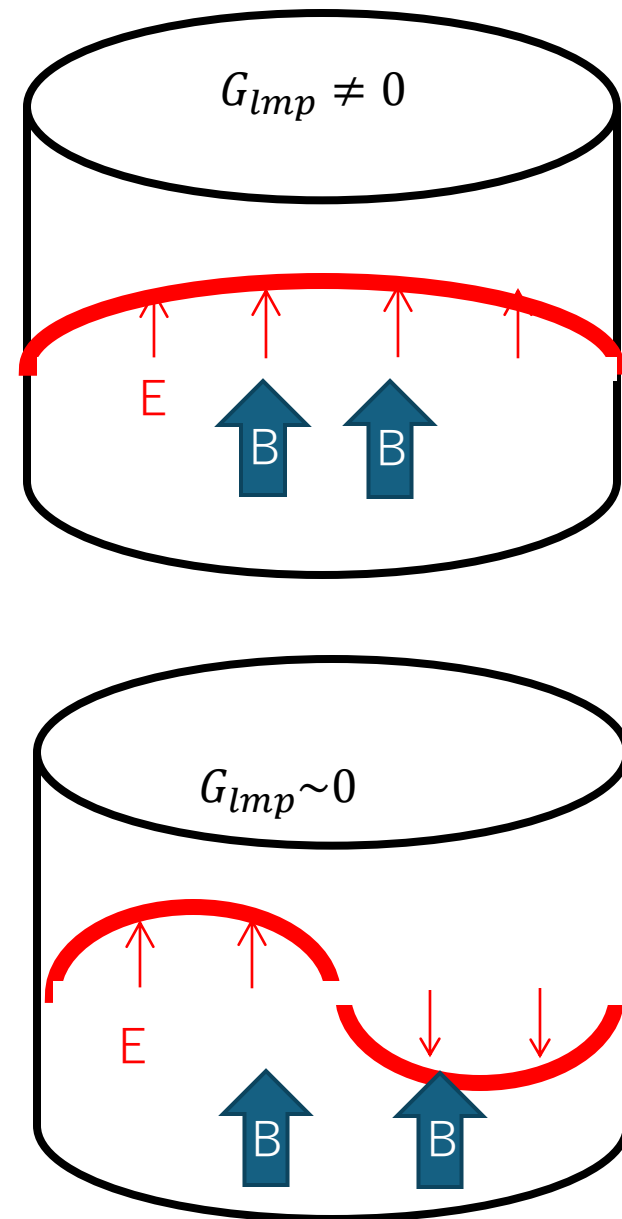


空洞開発

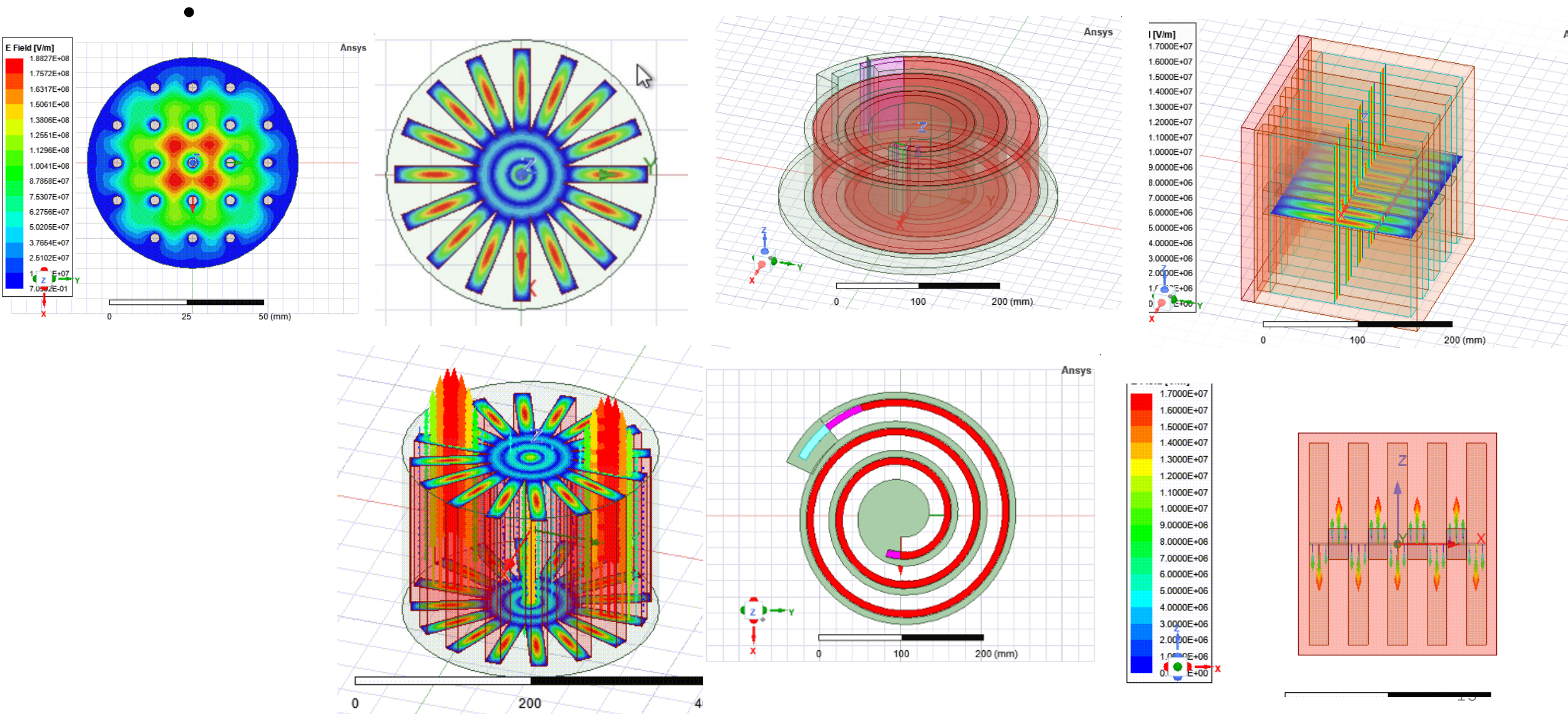
- Halo scopeを用いた暗黒物質アクシオン探索

$$\bullet P_{obs} = \frac{\beta}{1+\beta} G g_{a\gamma\gamma}^2 \frac{\rho V}{m_a} B^2 C_{\ell mp} Q_L, \quad C_{\ell mp} = \frac{(\int dV \vec{E} \cdot \vec{B}_0)^2}{|B^2| V \int dV E^2}$$

- 空洞に関しては, $V C_{\ell mp} Q_L$ が重要
- V が大きくて, $C_{\ell mp} \ll 1$ としない工夫が必要
- つまり, **節の無いモード**の利用

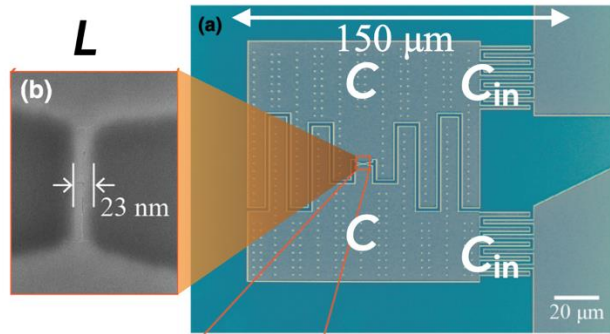


- $G_{\ell mp} \sim 0.1 - 0.7$ の大型, 高周波共振空洞

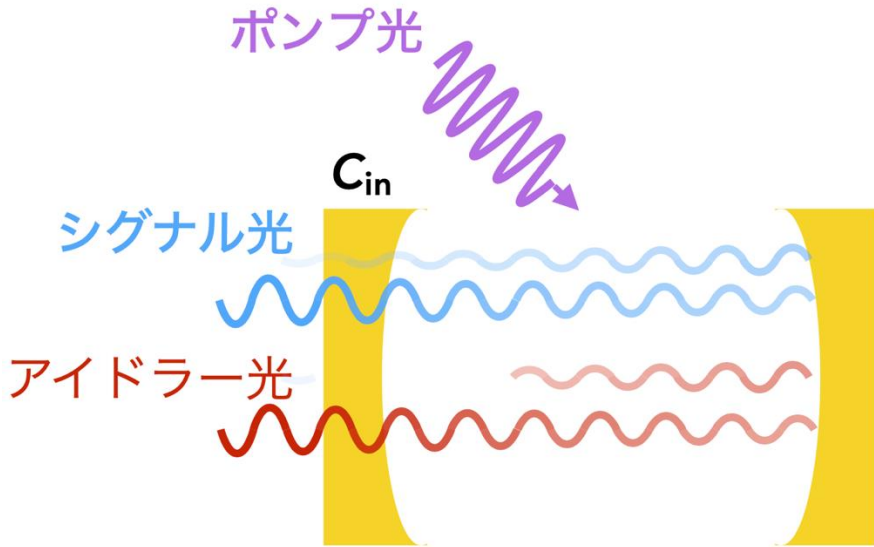


窒化物超伝導体を用いた共振器型 KIPA

共振器型増幅器



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



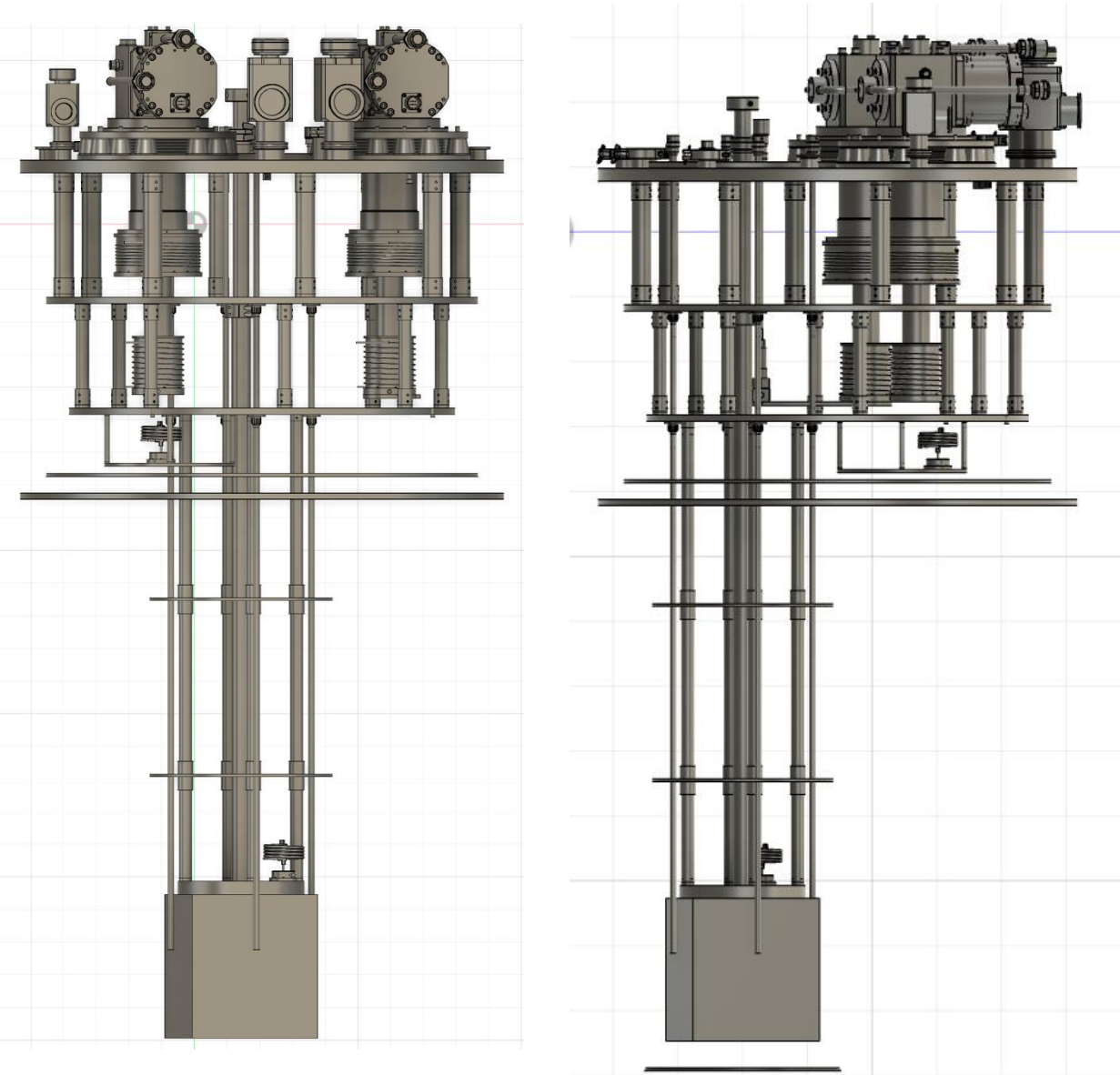
共振器内をシグナル光が往復しながら
ポンプ光のエネルギーを受け取り増幅

• KIPA

- 超伝導線の力学的インダクタンスの非線形性を利用
- 比較的高い温度で動作, 高磁場に耐性
 - 希釈冷凍機を使わずとも良い
 - $B_{\parallel} = 6 \text{ T}$ でも動作
- 低雑音
 - 量子限界@希釈冷凍機温度
 - $T_N \sim 2 \text{ K}$ @ LHe温度
 - 周波数帯域は, ひとまず, 13 GHz 程度まで

東北大 工 応物, 山下研と協力し, 開発中

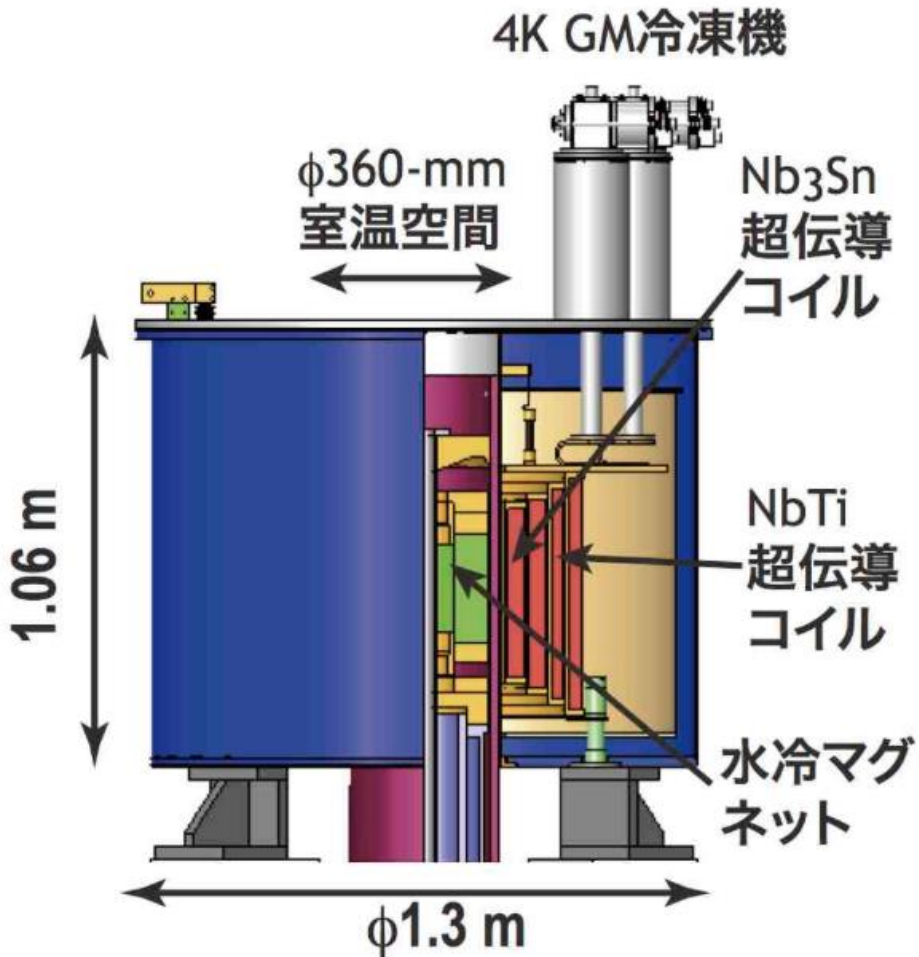
He超流動冷凍機



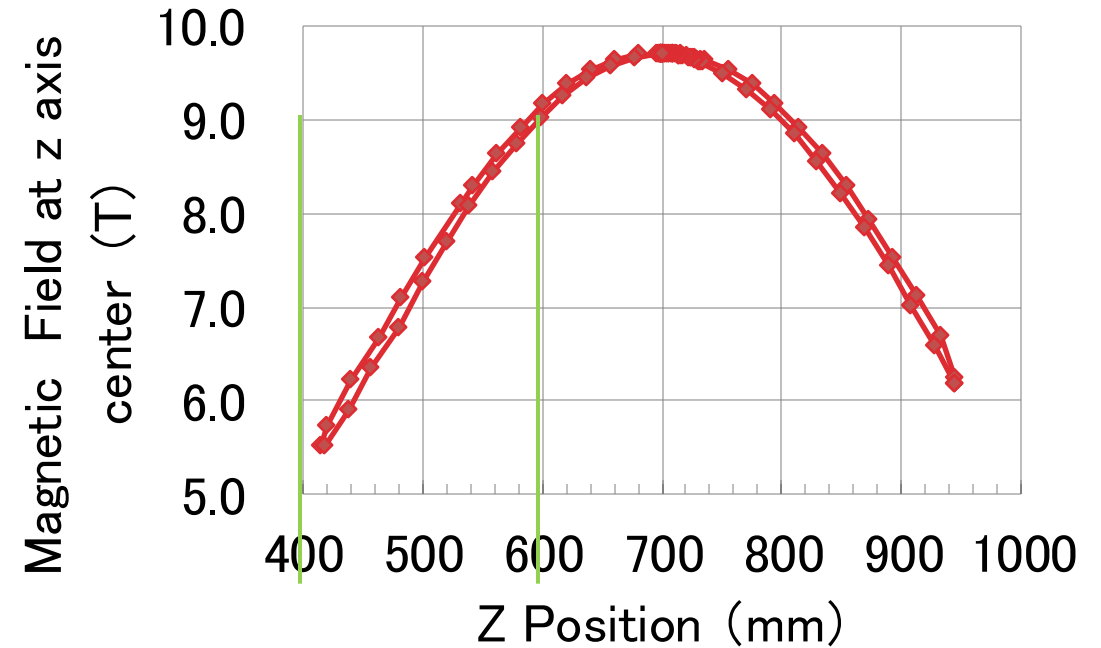
- 強力な冷却能力
- 安定運転
- $T_{\text{operation}} = 2 \text{ K}$
 - KIPAが導入可能に⇒ 低雑音化
- 試料室サイズ $\phi 290$ 、L200
 - 大型空洞が利用可能に⇒ 信号増強

強力・大型マグネット

東北大 金属材料研 強磁場センターの
ハイブリッドマグネット **9T360-CSM**

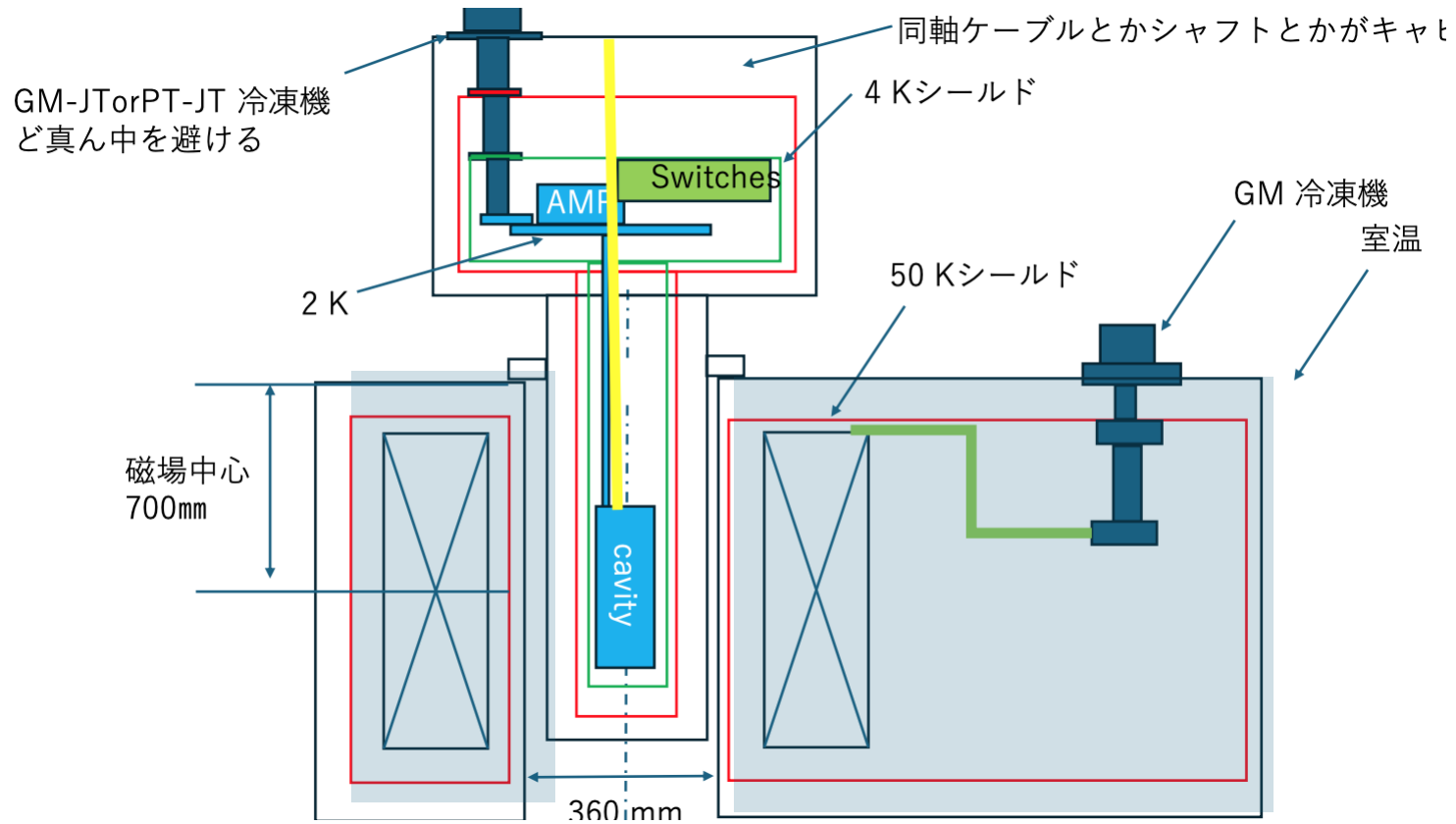


- 室温ボア **360mm**
- $B_{\text{max}} = \mathbf{9.4\text{ T}}$



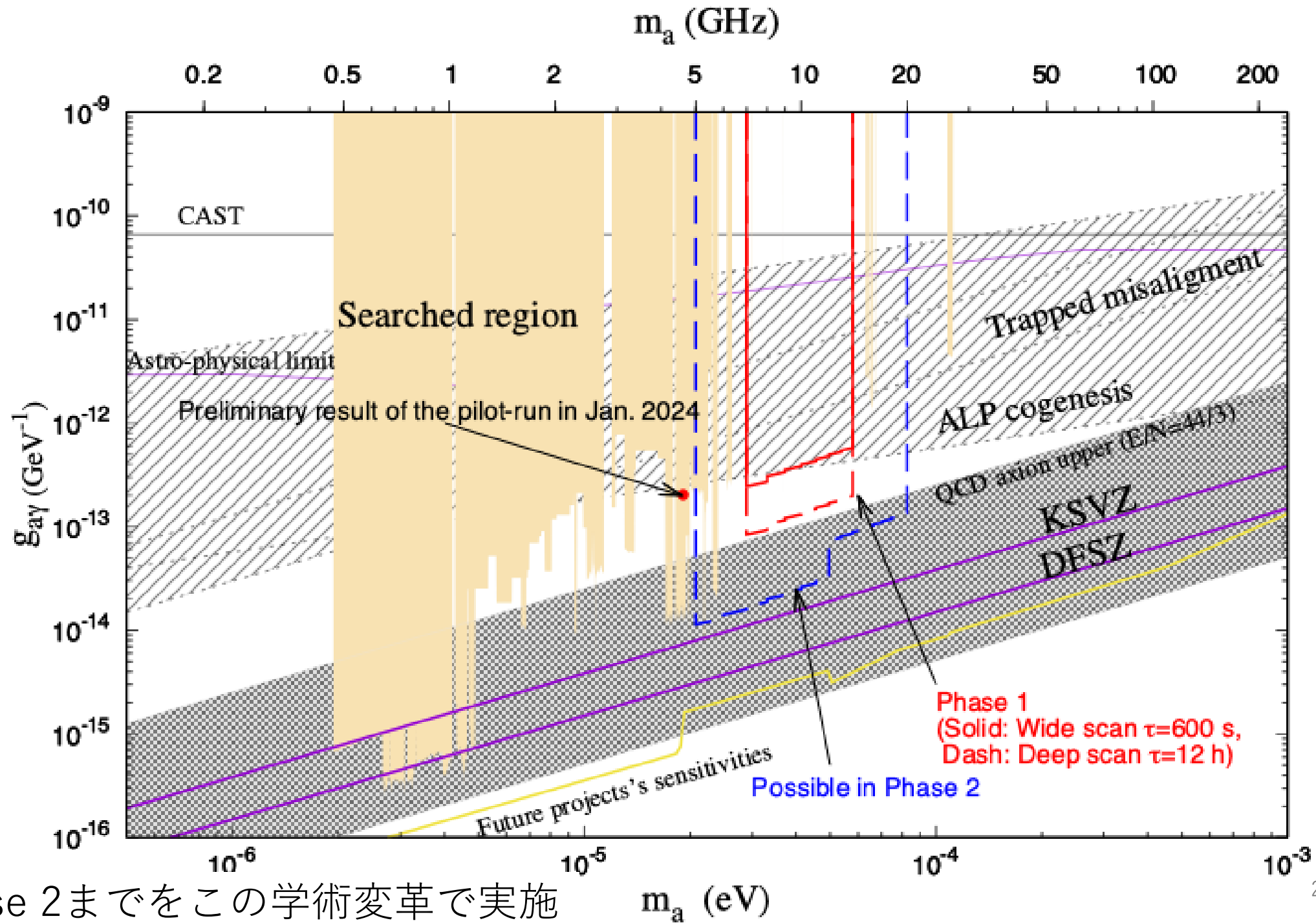
2025年度共同研究課題として採択¹された
2026年からは年間1ヶ月の物理実験を行う

He超流動冷凍機とマグネット



- 9 T360-CSMの室温ボアに差し込んで使用

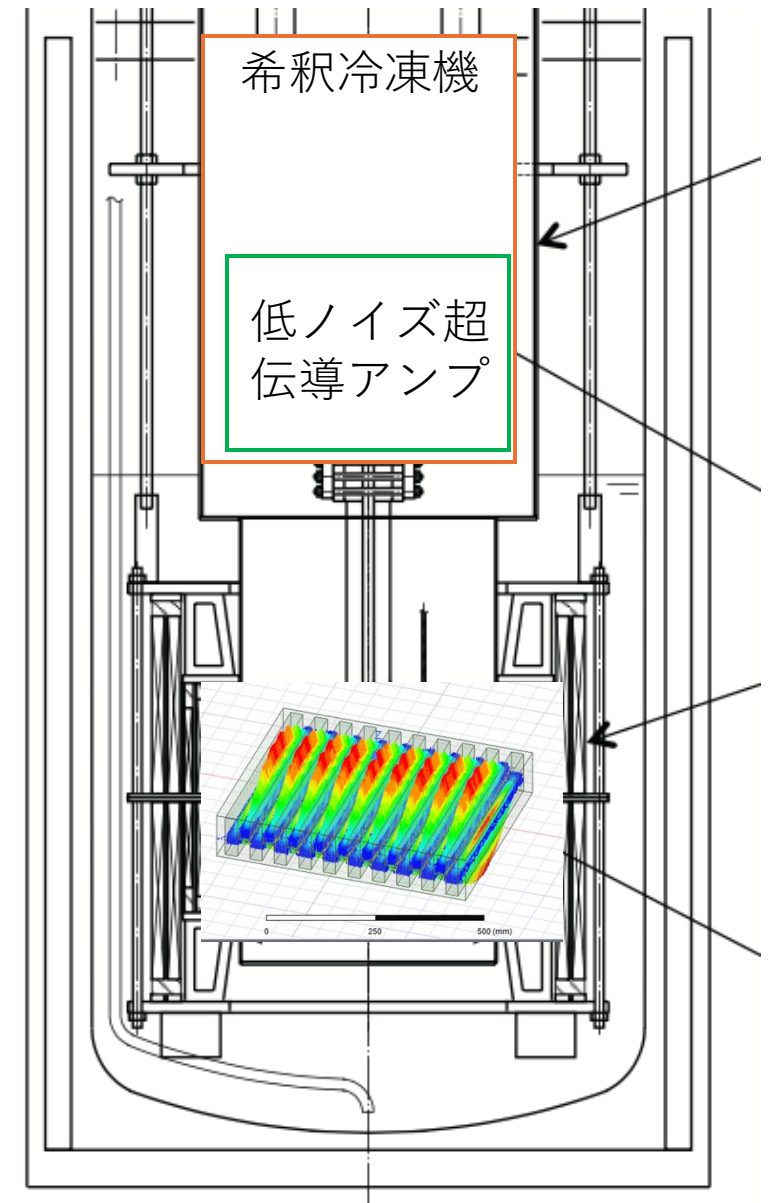
- **実験期間は 1 ヶ月/年**
- マグネットを使用しない期間は、RCNSで暗黒物質HP探索に利用
- 磁場から離れた位置に設置も冷却される
 - 軟鉄, ケイ素鋼, パーマロイなどを利用した消磁も措置する



このPhase 2までをこの学術変革で実施

将来計画 EDAMAME Phase 3

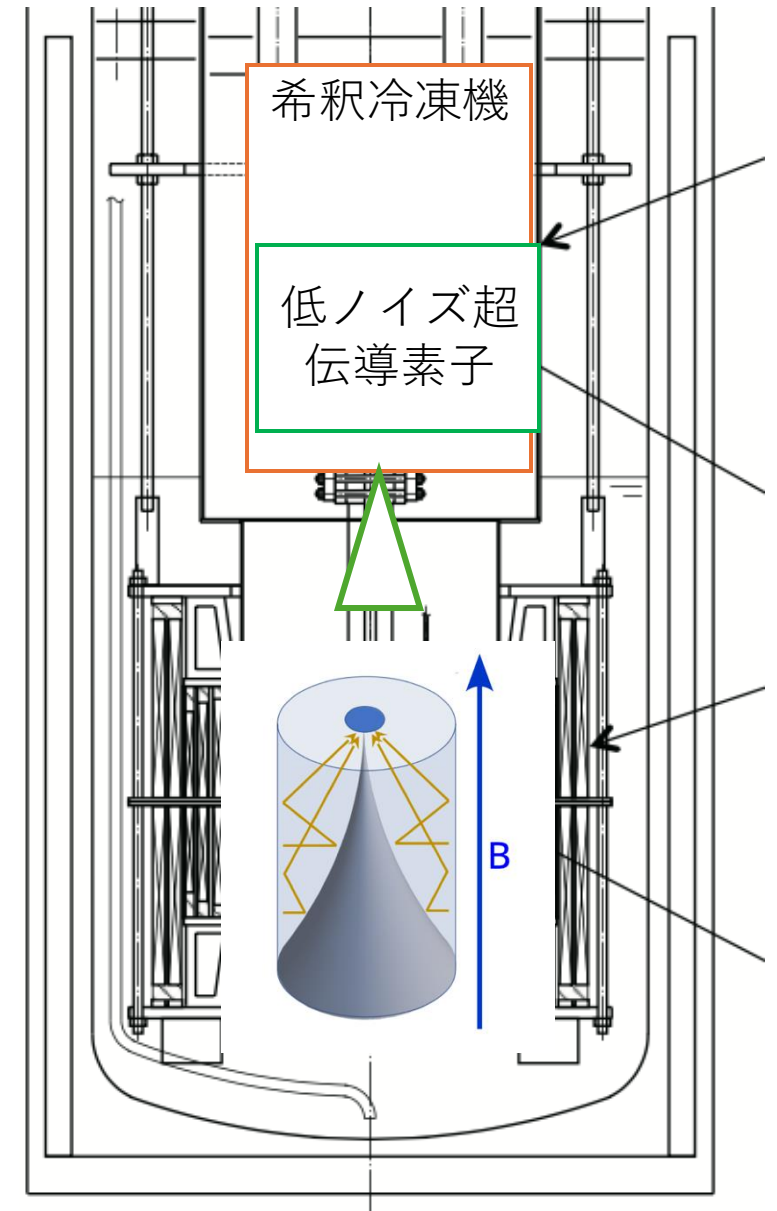
- **大型・強力な専用マグネットを占有**
 - 占有することで，広範囲を掃引しての探索
 - 強い磁場による信号増幅
 - 空洞体積の増加による信号増幅
- **希釈冷凍機**
 - 超伝導デバイスの全性能を使っての低ノイズ化
- **更に高周波側の開拓**
 - ～20 GHz位までは空洞



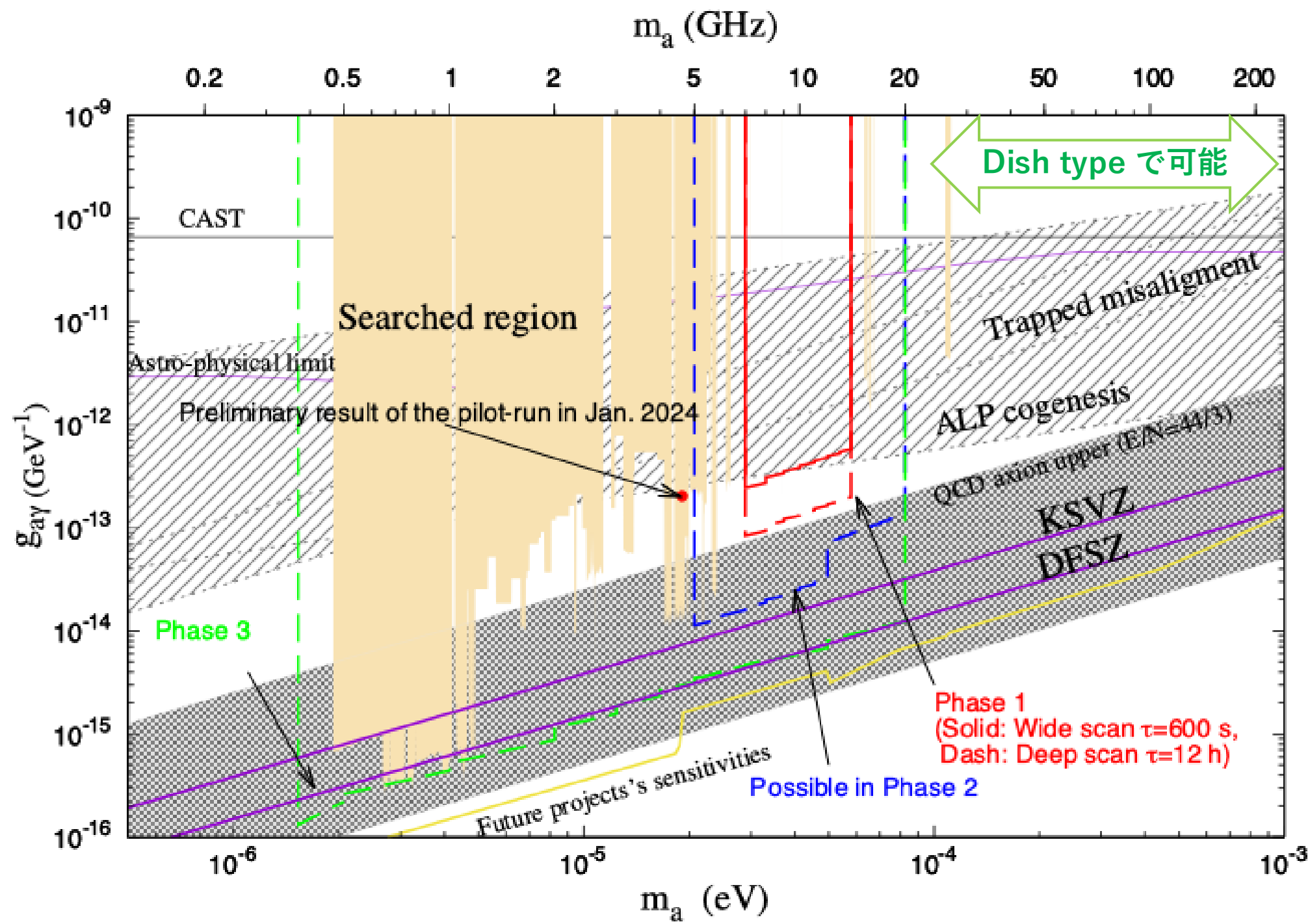
核融合研の13 T, 0.7 m マグネットの例

将来計画 EDAMAME Phase 3

- **大型・強力な専用マグネットを占有**
 - 占有することで、広範囲を掃引しての探索
 - 強い磁場による信号増幅
 - 空洞体積の増加による信号増幅
- **希釈冷凍機**
 - 超伝導デバイスの全性能を使っての低ノイズ化
- 更に**高周波側の開拓**
 - ～20 GHz位までは空洞
 - その先は**Dish type** も

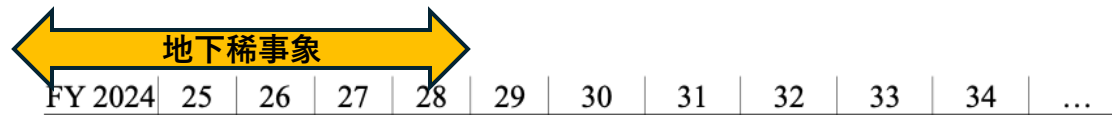


核融合研の13 T, 0.7 m マグネットの例



まとめ

- EDAMAME計画
 - 暗黒物質Axion, HPのHaloscope実験
 - 3つの段階を踏みながら, 発展・拡大



Phase 1 (On-going)

- RCNS magnet (9 T, $\varnothing 110$, $L200$)
365 days available
- $T=4$ K, HEMT amp.
- Cavity haloscope
 $f=7.5 - 8$ GHz (main region)
extend up to 14 GHz

Phase 2

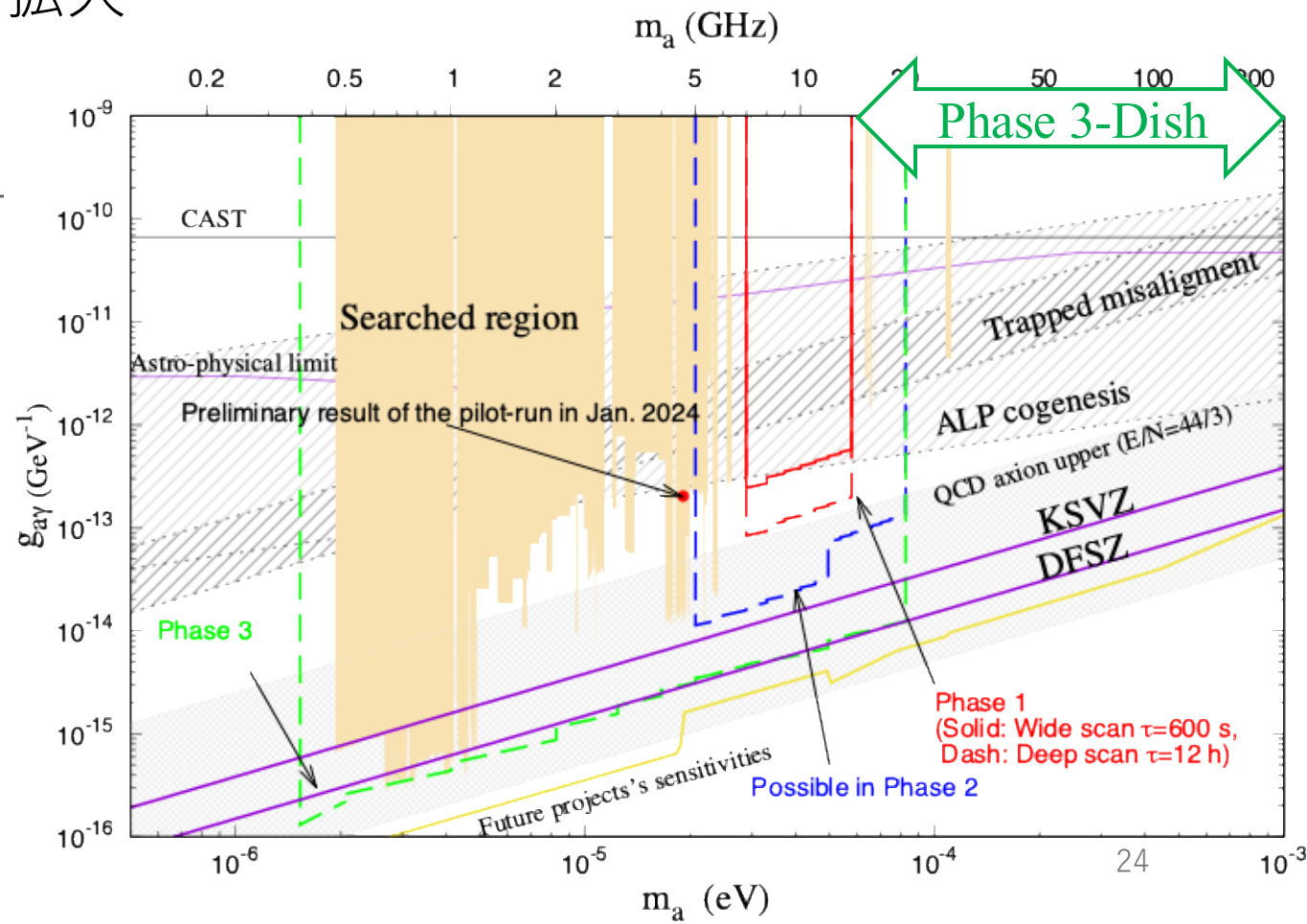
- HFLMS magnet (9.4 T, $\varnothing 290$, $L220$)
Available 1 month/year
- $T=2$ K, KIPA
- Cavity haloscope
 $f=7.5 - 8$ GHz (main region)
(Narrow freq. scan region due to limited operation time.)

Phase 3

- New strong magnet (12 T, $\varnothing 600$, $L600$)
365 days available
- $T=0.3$ K, KIPA
- Cavity haloscope
 $f=0.35 - 20$ GHz

Phase 3-Dish

- Phase 3 + Dish antenna
 $f=10 - 1,000$ GHz



謝辞

- この研究は、以下のサポートを受けて、遂行しています。
 - 24H02239 (FY2024～28)
 - 24H02236 (FY2024～28)
 - 23H03999 (FY2023)
 - 21K18621 (FY2021～23)
 - 19H05809 (FY2019～23)
 - 21H05446 (FY2021～23)
 - 17H02883 (FY2017～19)



