

■ 研究紹介

暗黒物質アクシオン探索 EDAMAME

東北大学 ニュートリノ科学研究センター

岸本 康宏

kisimoto@awa.tohoku.ac.jp

2026年(令和8年)2月4日

1 はじめに

この宇宙の約27%は、暗黒物質という謎の物質で占められている。暗黒物質の有力候補の1つがアクシオンである。本稿では、まず、なぜアクシオンが注目されているのかについて述べる。次に、先行する実験について、そして、様々なアイデアで新たに計画されている実験について触れる。最後に、このような、非常に熾烈な競争となっている状況下で新たに開始する EDAMAME (Explore DArk matter MysterY through Anomalous Microwave Emission) 実験について、その特徴や将来像について解説したい。

2 アクシオン

2.1 強い相互作用とアクシオン

アクシオンという仮想粒子が導入された理由は、「強いCP問題」と呼ばれる、強い相互作用の理論的予言と実験結果の間の矛盾に起因する。強い相互作用の理論では、アノマリーによってCP対称性が破られる。しかし、実験的には、強い相互作用は極めて精度良く保存されている。最も高い精度の測定は、中性子の永久電気双極子モーメントの実験で、 $|d_n| < 1.8 \times 10^{-26} e \cdot \text{cm}$ [1]と、極めて零に近い値である。この値をQCDのCPを破る項の係数 θ で表すと、 $\theta < 10^{-10}$ を意味し、CP対称性は極めて高精度で保存されている。しかし、理論的には $\theta = \mathcal{O}(1)$ と想定されるので、CP対称性を保存する何らかのメカニズムが存在すると考えられる。このメカニズムが、PQ対称性とその破れであり、この結果としてアクシオンが現れる[2]。アクシオンの背景には、軸性ベクトル異常、 θ 真空、など数々の要素が複雑に絡み合っているが、実験的には、1)アクシオンとレプトン間に直接の結合があるかどうか、2)光子との結合では、モデルに関わらず、そのラグランジアンが $L = g_{a\gamma} a \mathbf{E} \cdot \mathbf{B}$ で与えられる点が必要である。レプトンとの結合がある場合には、電子を用いて高感度に測定できる可能性がある。問題は、アクシオンが必ずしもレプトンと結合するとは限らない点である。その一方で光子との反応はモデルに依らず存在し、その結合定数 $g_{a\gamma}$

は、 $g_{a\gamma} = \left(0.203(3) \frac{E}{N} - 0.39(1)\right) \frac{m_a}{\text{GeV}^2}$ で与えられる。ただし

E, N は、カラー異常項、電磁気異常項に起因した定数である。 E/N の不定性があるものの、結合定数 $g_{a\gamma}$ とアクシオン質量 m_a が1対1に対応しているため、実験を遂行する上での目標となっている。よく使われるベンチマークモデルとして、KSVZモデル、DFSZモデルが登場する。KSVZモデルでは、アクシオンはレプトンと反応せず、また、 $E/N = 0$ である。DFSZモデルでは、レプトンとの相互作用がTreeレベルで存在し、また、大統一理論の値 $E/N = 8/3$ が採用されている。2つのベンチマークモデルの他にも様々なアクシオンモデルが存在する点に留意する必要がある[3]。

2.2 暗黒物質アクシオン

このように、アクシオンは強いCP問題を解決する素粒子であるが、これと同時に、暗黒物質の候補となることが指摘されている。暗黒物質は、この宇宙の約27%を占める正体不明のエネルギー源である。我々にとって馴染みの深い「通常の物質」は、宇宙の約5%に過ぎないことを思い出すと、「暗黒物質の正体を知らずして、宇宙の姿を知ったとは言えない」であろう。強いCP問題のみならず、このような重要な問題もアクシオンが解決する可能性がある。この点が、アクシオンが注目される理由である。

暗黒物質アクシオンは、宇宙初期にPQ対称性が自発的に破れた際に生成される。生成量は、アクシオンのモデルそのもの、そしてアクシオン生成のモデルに依存するが、アクシオンによって宇宙が閉じてしまうことがないことが必須となる。このような暗黒物質としての基本的な要請などから、アクシオンの質量の予言をいくつかをまとめたのが図1である[4]。最も重要なポイントは、質量が非常に軽く、 10^{-11}

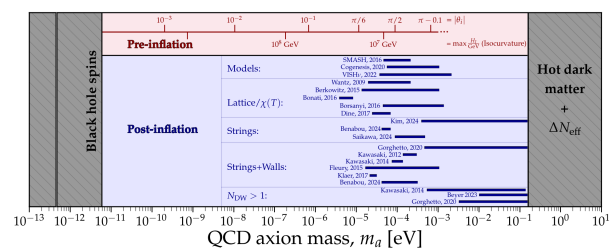


図1 暗黒物質アクシオンの質量に対する予言の例[4]

~10⁻¹ eV まで、非常に広範囲に亘る点である。歴史的には、アクシオンの生成メカニズムとしてMisalignment機構が考えられてきたが、研究の進捗にもなつて、特にPQ対称性がインフレーション後に破られた際に、位相欠陥などから放出されるアクシオンが暗黒物質となり得る事が指摘され[5]、注目すべきアクシオン質量範囲の上限が上に拡大されてきた。

3 共振空洞を用いた暗黒物質探索

3.1 暗黒物質アクシオンの性質

暗黒物質アクシオンの質量が小さいことは、実験手法に大きく影響する。暗黒物質の運動速度は、 $\beta = 10^{-3}$ と見積もられ、そのド・ブロイ波長 λ は $\lambda \sim 1.2 \left(\frac{10^{-5} \text{eV}}{m_a}\right) \times 10^2 \text{ (m)}$ と非常に長い。我々の銀河内の暗黒物質の質量密度 ρ を $\rho = 0.3 \text{ GeV/cm}^3$ と仮定して、1 cm³辺りの数密度を計算すると、 $3 \times 10^{13} \times \left(\frac{10^{-5} \text{eV}}{m_a}\right)$ (個)となる。これらの見積から、暗黒物質アクシオンは「コヒーレントな波」として我々の周囲に存在していることが分かる。また、アクシオンの小さな質量を光子の周波数 ν として換算すると、 $E \approx m_a c^2 = h\nu$ の計算から $\nu = 2.4 \times \left(\frac{m_a}{10^{-5} \text{eV}}\right)$ (GHz) とマイクロ波の領域となる。運動エネルギー K とアクシオンの質量 m_a の比は、およそ $\beta^2 \sim 10^{-6}$ であるので、暗黒物質アクシオンを検出する場合には、コヒーレントな波であるアクシオンが転換した、ほぼ単色のマイクロ波信号を検出することになる。

3.2 マイクロ波共振空洞の利用

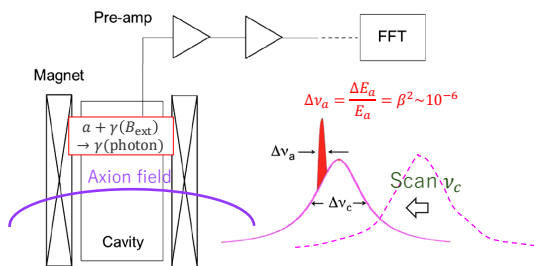


図2 共振空洞を用いたハロースコープ実験の原理。強磁場中でアクシオンが光子に転換され、共振空洞で増幅される(図左)。信号は、周波数毎の電力として測定される。アクシオン質量が不明であるため、共振空洞の共振周波数を掃引して探索する必要がある。(図右)

この特徴を活かし、これまでの暗黒物質アクシオン探索で最も成功している手法が、共振空洞を用いたアクシオンハロースコープである[5]。この手法では、外部から磁場 B を印加し、その磁場とアクシオンの相互作用によって生じたマイクロ波信号を、極低温下に設置した共振空洞で増幅して検出する(図2)。

この信号強度は、次式で与えられる。

$$P = \frac{\beta}{1 + \beta} g_{a\gamma}^2 \frac{\rho}{m_a} B^2 G_{\ell mp} V Q_L$$

ここで、 β は空洞と検出アンテナの結合の強さ¹、 V は共振空洞の体積、 Q_L は共振空洞のQ値²、 $G_{\ell mp}$ は $G_{\ell mp} = \frac{(\int dV \mathbf{E} \cdot \mathbf{B})^2}{(B)^2 V \int dV E \cdot E}$

で定義される量である。マイクロ波共振器のQ値は、 $Q_L = 10^{+4} \sim 10^{+5}$ からそれ以上を実現することができるため、アクシオン信号が著しく増加されることが分かる。この信号増幅の原理は、マイクロ波共振器の共振周波数とアクシオン信号光子のコヒーレントな振動の周波数がマッチした場合に生じる強制振動である。この一方で、雑音は、共振空洞内の熱雑音に起因した光子やアンプの熱雑音であり、位相がランダムであるために強制振動による増幅が生じない。つまり、この手法では、信号のみが Q_L 倍に増幅される。この点が、ハロースコープの著しい特徴である。

この空洞内の雑音光子を抑制するために、共振空洞は極低温に冷却して使用される。アンプの雑音対策では、天文観測などを目的に低ノイズのクライオアンプが精力的に開発されてきた。最近では、超伝導を利用した、量子限界に迫る極低ノイズのアンプが開発され、利用されている。このように、極低温下で、極低ノイズのアンプを利用して、共振空洞で増幅された微弱なアクシオン信号を高感度で読み出す実験が、ADMX実験を筆頭に多数行われている。しかし、長きに亘る努力にも関わらず、未だアクシオン発見には至って

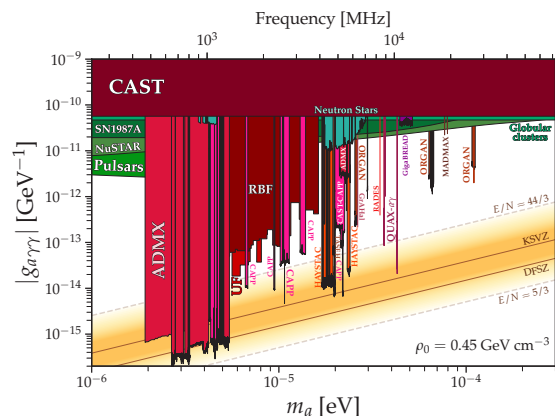


図3 暗黒物質アクシオン探索の現状[7]

¹ $\beta = 1$ の臨界結合に設定する場合が多い。
² もっと正確には、loaded Q と呼ばれる、アンテナによるエネルギー損失も含めたQ値。

いない。実験結果の現状を理論の予言とともに図3に示した[7]。

3.3 共振空洞を用いたハロースコープの課題

図3を見ると、 $m_a \geq 3 \times 10^{-5}$ eV程度(周波数では $\nu \geq 7$ GHz程度)の広大なパラメータ領域が未探索のままであることが分かる。図1に記された、質量の理論的予言の範囲と比べると、高いエネルギー領域は、実験的に取り残された領域となっている。この理由はいくつか考えられるが、もっとも根源的と思われる要因は、周波数が高くなると、体積の大きな共振空洞を用いることが困難となる点である。円筒形や矩形のような、単純な形状の共振空洞の場合、共振周波数は共振器のサイズで決まる。したがって、周波数が高くなると共振器の体積が小さくなってしまふ。体積を稼ぐために、大きな体積の空洞で高次のモードを利用しようとしても、先述の G_{emp} が小さくなってしまふ。この理由は、高次のモードでは、モードに節があり、その両側で電場の向きが変わり、一様磁場の下では、 G_{emp} の分子の積分がキャンセルしてしまふからである(図4)。

この問題、すなわち、高い周波数における $G_{\text{emp}}V$ の低下の問題は古くから認識されており[8]、高い周波数での探索を遂行する上で、解決すべき最重要の課題である。この課題に対する1つの答えがdish antennaの方法である[9]。dish antennaでは、磁場中に置かれた電磁場の境界面でアキシオン由来のマイクロ波信号が発生することを利用する。この手法では、表面積の大きさが増幅に寄与する因子となっており、高い周波数領域で有利となる。MADMAX実験[10]、BREAD実験[11]などがこの手法を用いた実験を計画している。

われわれのグループでは、高周波数領域でのハロースコープの実現に挑戦すべく、2017年から研究を行ってきた。図5に、これまでに検討してきた空洞の例を示す。2021年に

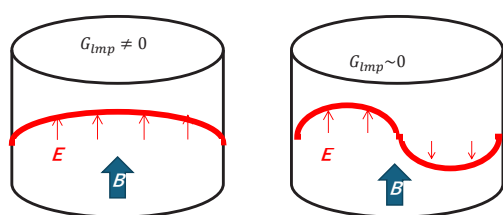


図4 最低次のモード(左)と高次のモード(右)における G_{emp} を説明するための概念図。最低次のモードでは節がなく、したがって、電場は一定の方向である。高次のモードでは、節の左右で電場が反転し、 G_{emp} の分子の積分でキャンセルが生じ、 $G_{\text{emp}} \sim 0$ となる。節が偶数個の場合には、キャンセルされない部分が残るが、有効に体積を使えていない状態である。

³ 強力な磁場のため、磁石を用いた機構は使用できない。また、極低温であるため、バネの利用も限定的となる。さらに、動作時の発熱は、冷却に影響のないレベルに抑制す

は、フォトニック結晶構造(図5左端)を用いて、単純な直方体の空洞に比べて約25倍の体積の共振空洞の開発に成功した[12]。

高い周波領域では、共振空洞のQ値も課題の1つとなる。ハロースコープでは、Q値が高いほど、信号強度が増加するため、高いQ値が望まれる。しかし、これは、十分長い間、強制振動が励振された平衡状態の場合であり、この平衡状態に到達するまでの時間はQに比例する。また、アキシオン信号の信号幅は $\Delta\nu/\nu \sim 10^{-6}$ と考えられている点を考慮すると、Q値は $Q \sim \nu/\Delta\nu \sim 10^6$ 程度が1つの目安であり、これを越えるQ値はあまり効果的ではない。また、Q値と関連して、実験的には共振周波数の掃引する機能も深く検討する必要がある。すなわち、周波数の掃引では、広いダイナミックレンジと精密なチューニングという、相反する要請を満足する必要がある。周波数掃引の精度は $\Delta\nu/\nu \sim Q^{-1} \sim 10^{-5} - 10^{-6}$ が要請され、これを強力な磁場の印加された極低温の環境³の下で確実に行うことが必要である。

第二の課題は、適切な極低ノイズアンプの開発である。昨今の薄膜形成技術と微細加工技術の著しい向上により、超伝導材料を用いてアンプを作成可能となってきた。超伝導素子を用いたアンプでは、その雑音は、量子限界、または、それ以下に抑制することができる。現在では、量子コンピュータの開発が急ピッチで進んでおり、その進捗に歩調を合わせ、Q-bitの信号を得る手段として、極低ノイズの超伝導初段アンプ、そして、その後段に設置する低電力HEMTアンプの開発などが凄まじい勢いで進展している。この成果を、アキシオン探索に応用することが求められている。特に、より高い周波数領域への開拓を目指した開発が期待されている。

第三番目の課題は、磁場の強化と大型化である。アキシオン信号は磁場の二乗に比例するため、磁場の強化は信号の

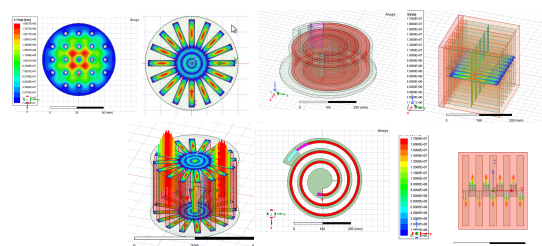


図5 開発中の数々の空洞。左から、フォトニック結晶構造を利用した空洞、矩形空洞を中央で連結した空洞、矩形空洞をソレノイドマグネット内にフィットするように渦巻き型にした空洞、矩形空洞を導波管で接続した空洞。マグネットのサイズと形状と、使用する共振周波数によって最適な空洞形状が異なる。実験の研究者としては腕の見せ所である。

必要がある。開発では、アイデアとそれを実現する技術が試される。

増大に直結する。現在、もっとも一般的に利用されている超伝導コイルは NbTi 合金製であり、そのコイルで作られる磁場強度は 9~10 T である。CERN では FCC-hh のために Nb₃Sn を用いたマグネットが開発されてきた。この磁石は 14 T の双極子磁石 [13] で、この磁場まで強化できれば、信号強度を 2~2.5 倍に増強できることになる。さらには、高温超伝導体 (HTS) の利用も考えられる。韓国グループは 18 T の HTS ソレノイドを用いた実験を行っている [14]。核融合ベンチャーの中には、大口径の 20 T を超える HTS マグネットの開発を狙うところもある [15]。実際の実験に使用するためには、線材そのものの開発、巨大な応力に耐える構造体の設計、冷却装置、クエンチ対策などクリアする必要がある。さらに、磁石が強くなると、超伝導アンプの部分をどのようにして消磁するのか、という問題もある。初段アンプは検出器のすぐそばに設置すべきであるが、そこは最も磁場の強い領域である⁴。地味だが非常に悩ましい問題である。これら数々の問題を乗り越え、探索の高感度化とそれによる暗黒物質アクシオンの発見が期待されている。

4 EDAMAME 実験

以上述べてきたように、暗黒物質アクシオン探索は長い歴史を持ち、その進捗が著しい研究テーマである。特に共振空洞を用いたハロスコープは原理的に優れているが、その一方で、アクシオン質量が高い周波数領域である場合には、今後解決すべき挑戦的な課題が多岐に数多く残っている。すなわち、共振空洞を用いたアクシオン探索は、まだまだ「これから」の研究と言える。われわれは、この認識の下、EDAMAME 計画を立案した。計画では、到達可能な範囲からスタートし、段階的に発展させることを重視し、三段階の計画となっている。

4.1 EDAMAME までの小史

EDAMAME 計画自身の説明の前に、EDAMAME に至るまでの準備実験などについて、ここで少し触れておこう。先にも述べた通り、2017 年から、アクシオン探索のためのマイクロ波共振空洞の開発・研究に着手した。実は、当時すでに、ジョセフソン接合を用いた極低雑音のパラメトリックアンプは開発されており、8 GHz 程度までのマイクロ波を増幅することは可能であった。しかし、それを利用するためには、希釈冷凍機による冷却が必要であった。希釈冷凍機をどこかに頼み込んで借りるとしても、その試料空間に高磁場を印可

⁴ かつて、超伝導を研究している先生と雑談していたとき、「アクシオン実験では、強磁場と超伝導素子の両方を必要とする」という主旨のことを言うと、その先生から「それは最悪の組み合わせですよ」と忠告された。この言葉が「全く正しい」とたびたび痛感する。

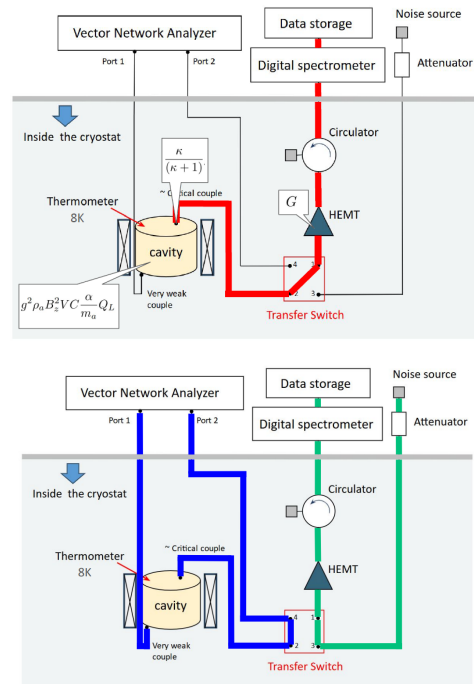


図 6 データ取得時 (上) とゲインなどの較正データ取得時 (下) のダイヤグラム。ゲイン較正では、外部のノイズソースとアッテネータでパワーを変えながら信号強度を測定する。共振空洞の共振周波数と Q 値、アンテナ結合 β (図中では κ と記載) などを測定する。

することは難しく、アクシオン探索を実行することは困難であった。また、アクシオン信号の式を見ると、マイクロ波空洞に関わる項は G_{amp} , V , Q_L と複数あるので、「信号・雑音比の観点からは、雑音 (つまり、低ノイズアンプ) も大事だが、今は信号 (つまり、マイクロ波空洞) だ」と判断し⁵、マイクロ波空洞の大型化の研究・開発を進めることとした。実際問題としては、マイクロ波についての経験も不足していたため、この開発・研究で、マイクロ波技術の経験を積むという目論見もあった。2019 年に超伝導マグネットとクライオスタットを導入し、磁場中でのマイクロ波空洞開発を進めた。これらのマイクロ波空洞の開発を通じて、マイクロ波技術を少しずつ習得し、2023 年 1 月には磁場なし常温環境下で、 $\nu = 4.957 - 4.972$ GHz の領域で暗黒物質暗黒光子⁶の探索を実施した [16]。そして、2024 年 1 月には、 $B = 9.0$ T の磁場を印加したクライオスタット内 ($T = 8.55$ K) に共振空洞を導入し、本格的なアクシオン探索に向けてパイロットランを行った [17]。このパイロットランでのデータ取得系の概略図を図 6 に記した。またこのときの測定データが図 7 で

⁵ このときに、「磁場はなくても、暗黒光子探索は可能だ」と判断していたら、また別の歩みとなったであろう。

⁶ 暗黒光子は Hidden Photon などとも呼ばれるベクトル粒子で、電磁場と直接に混合する。この混合 (kinetic mixing, χ) によって、磁場がなくても、信号が現れる。

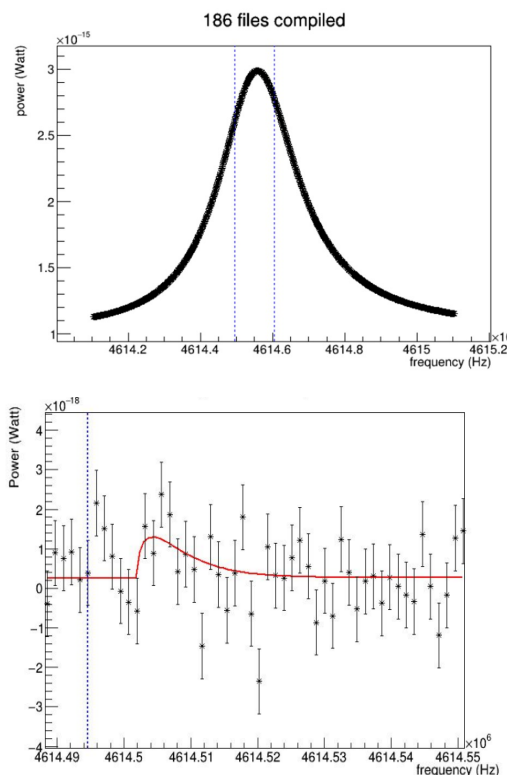


図7 2024年のアクシオン探索パイロットランのデータ(上)とバックグラウンドを差し引き、信号のフィッティングを行ったときの様子(下)。

ある。これらの実験の各種パラメータと得られた上限値(90%)を表1にまとめた。

これらのランでは、様々な問題が生じ、それを1つ1つ解決することが求められた。例を挙げると、当初の周波数変調機構では振動の影響で共振周波数の揺らぎが生じる、マイクロ波ケーブルに触るとスペクトルがわずかに歪んで、較正データに影響があるなどである。これらの対策として、周波数変調機構の設計変更、遠隔監視装置の導入と測定の自動化を進め、実験室内に立ち入らずともゲイン較正などが実行できるようにシステム構築するなどを行った。現在も改良を続けている。特筆すべき成果としては、われわれの測定系は極めて安定に動作し、長時間積分によって感度を稼ぐことができるという点である。

4.2 EDAMAME の戦略

このような研鑽と成果をもとに、われわれはEDAMAME計画をスタートさせた。われわれの戦略は以下のようになっている。

- Phase 1: 現在保有している実験装置を用いて、物理探索を実施する。同時に、新たな技術を習得する。特に、超伝導マイクロ波アンプの開発・研究を進める。

表1 2023年、2024年のテスト実験の各種パラメータ

	暗黒光子探索	暗黒物質探索
実験期間	2023年1月	2024年1月
探索領域 (MHz)	4,957.06~4,971.80	4614.545
(μ eV)	20.501~20.562	19.08422148
磁場(T)	なし	8.76 \pm 0.9%
温度	23.7 \pm 0.8 ($^{\circ}$ C)	8.85 \pm 0.01 (K)
Q値	690 (典型値)	18,463 \pm 0.12%
体積(cm^3)	375	370
G値	0.47	0.605
積分時間(h)	約12	2.58
結果(上限)	$\chi = (1-3) \times 10^{-12}$	$g_{ay} = (0.8-2.0) \times 10^{-13}$

- Phase 2: 超伝導マイクロ波アンプと大型共振空洞、大型マグネットを導入して、高感度の実験を行う。
- 将来計画 (Phase 3): 専用の大型冷凍機、マグネットを利用して、DFSZアクシオンモデルに到達する感度での実験を遂行する。

計画の年表を図8に掲載する。

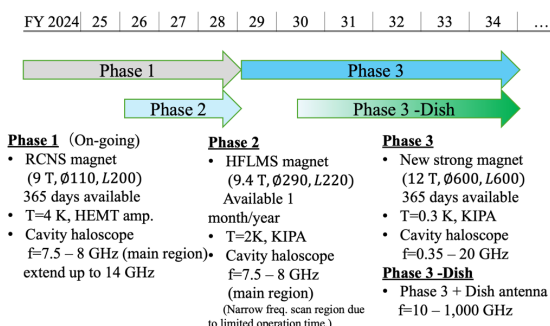


図8 EDAMAMEの年次計画

4.3 EDAMAME Phase 1

Phase 1では、既存の装置を利用して、意味ある物理探索を行うことを主眼に計画を進める。主要な装置は、東北大学ニュートリノ科学研究センターが所有する、最低到達温度3.8 K(無負荷)で、試料室スペースが直径110 mm、長さ200 mmのクライオスタットとその領域を9.0 Tに励磁するNbTiマグネットである(図9左)。データ収集系を含め、これらの装置は、2024年のパイロットランで使用した装置である。共振空洞は、より高い周波数領域での探索のために新規に作成した空洞を用いる(図10上)。この空洞で7.35~7.9 GHz (30.4~32.67 μ eV)の探索が可能となる(図10

下)。このようなセットアップによって、探索可能な領域と到達予想感度を図 11 に示した。

Phase 1 は、「今あるもの」を使った探索であり、感度にも限界がある。しかし、その探索範囲の中に、“Trapped misalignment” [18], “ALPogenesis” [19] などのモデルが予言する領域が含まれているため、暗黒物質問題の解決につながる大発見の可能性もあり、この点が Phase 1 の魅力である。

Phase 1 では、探索に並行して、超伝導アンプの開発研究も行なっている。このアンプは、共振器型の力学的インダクタンスを利用したパラメトリックアンプ (Kinetic Inductance Parametric Amplifier, KIPA) である (図 12)。超伝導素材として、超伝導転移点が高い窒化ニオブ (NbN) を用いることで、磁場が印加された環境にも強いアンプである。先行研究 [20] によると、温度が 10 mK、基板に並行な 6 T の磁場が印加されている環境下で、雑音は量子限界、ゲインは 20 dB 以上のアンプの開発に成功している。磁場なしの場合では、雑音は、850 mK の温度下で量子限界に到達する。磁場が存在する環境下であっても稼働する極低ノイズアンプは、アクシオン探索に最適な特徴である。現在、7.675 GHz を中心とした共振器型 KIPA の開発・研究を行っている。いまのところ、増幅可能な帯域を 13 GHz 程度までは実現可能であるとの感触を得ている。この領域では、超伝導極低雑音アンプは実用化されておらず、したがって、実用化されれば、ライバル実験への大きなアドバンテージとなる。

4.4 EDAMAME Phase 2

Phase 2 は、新たに導入するヘリウム超流動の冷凍機を東北大学 金属材料研究所 強磁場超伝導材料研究センターの 9T360-CSM に設置して、実験を行う予定である (図 13)。9T360-CSM は、2つの超伝導マグネット (NbTi と Nb₃Sn) によって、常温ボア 360 ミリ内に 9 T の磁場を発生すること

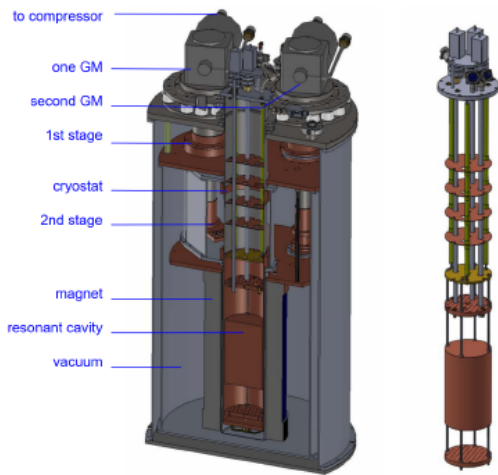


図 9 EDAMAME Phase 1 で使用するクライオスタットとマグネット

ができる。この巨大な常温ボアに、超流動ヘリウム冷凍機を挿入して利用する。この構成によって、環境温度 2 K、磁場

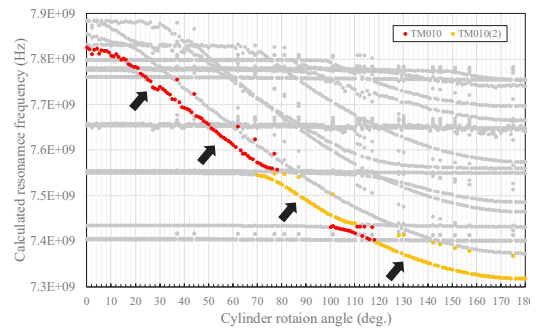


図 10 EDAMAME Phase1 で使用する、新作の共振空洞の写真 (上蓋をとった時 (左上) と室温でのテスト用に周波数駆動系を取り付けた時 (右上))。内部の円筒と外部の円筒の軸は 1 ミリずれており、内側の円筒を回転させることで、共振周波数を変調できる。下図は、その角度と共振周波数 (計算値) のグラフ。矢印が実験で用いる共振モード (TM₀₁₀ モード)。

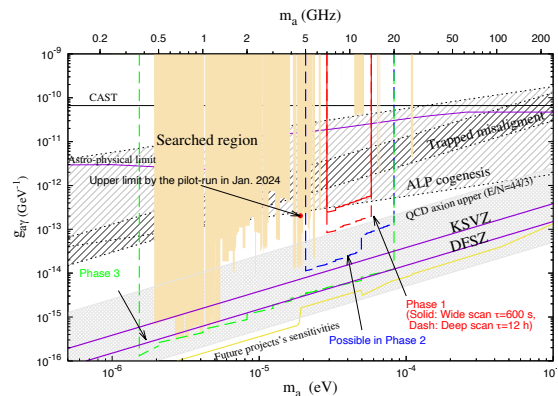


図 11 EDAMAME の感度予想曲線。これまで行われた先行研究の結果は [7] でまとめられているデータを用いた。2024 年のパイロットランの結果の中で、最悪値も赤点でプロットした。Phase 1 では、積分時間を短くし、素早く周波数掃引を行う場合 (実線) と長時間 (12 時間) の積分を行う場合 (点線) とが考えられる。後者の場合は、図示した領域の一部の探索となる。Phase 2 では、マグネットを利用できる期間が年に 1 ヶ月であるので、探索できる周波数は極一部の周波数に限定されることに注意されたい。

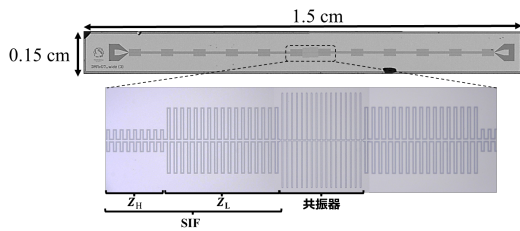


図 12 開発中の共振器型 Kinetic Inductance Amplifier (KIPA) の全体像 (上図) と共振器部分の拡大図 (下)

9 T, 直径 280 ミリ, 長さ 220 ミリの試料室を実現する。この試料室空間に, これまで開発してきた大型空洞を導入することで信号強度の増強を図る。

マグネットの共同利用については, 2025 年度から共同利用課題に採択されており, 2025 年 11 月と 12 月に 24 時間の連続励磁運転によるテストを実施した。このテストでは, Phase 1 で使用しているクライオスタットインサート部を, 共振空洞など測定器系一式とともに, 9T360-CSM の室温試料部に導入した。このテストでは, 漏れ磁場の影響が想定よりも大きいことが判明した。また, マイクロ波スペクトルに原因不明のゆがみが見られるなど, 大口径強磁場マグネットを実際に利用する上での問題点の洗い出しを行うことができた。これらの問題点を解決し, 2026 年度に再度のテスト実験を行い, 2027 年度以降は, 年間 1 ヶ月の物理測定を実施する予定である。

新規に導入するヘリウム超流動冷凍機 (図 14) では, 試料室の拡大に加えて, 運転温度を 2 K 程度まで下げることができる。2 K のステージを, ソレノイドマグネットの中心付近の他に, 磁場の小さい場所にもう 1 か所用意し, そこに現在開発中の KIPA を導入する。これによって, 強磁場環境と超伝導素子の利用を両立させることができる。ヘリウム超流動冷凍機では, 希釈冷凍機に比べ, 最低到達温度が高く

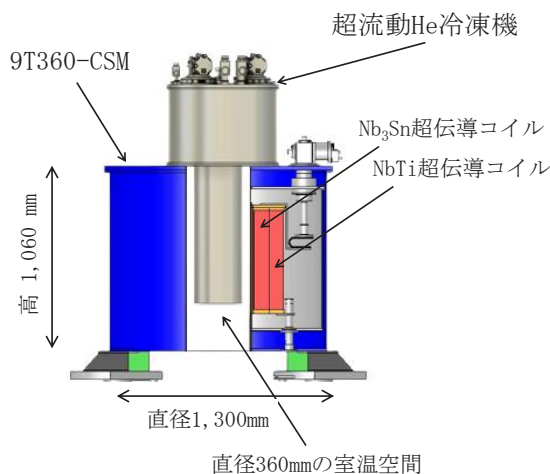


図 13 Phase 2 での実験装置の構成。新規に導入する超流動ヘリウム冷凍機を, 東北大学 金属材料研究所 強磁場超伝導材料研究センターの 9T360-CSM に導入する予定である。

なってしまうが, 強力な冷凍能力を持っているため, データ取得を安定して継続することができる。

このように Phase 2 では, 巨大なマグネットと強力な冷凍機を用いることで, 大型共振空洞, 極低雑音アンプを導入し, 高感度の測定 (図 11) を行う非常に重要なステップであり, 標準的なアクシオンモデルへの切り込みを目指す。

4.5 EDAMAME Phase 3

Phase 2 では, マグネットを利用できる時間が限られている。これはアクシオン探索にとっては大きな課題であり, 大型で強力なマグネットを継続的に利用することが必須である。また, ベンチマークである KSVZ, DFSZ アクシオン, さらに, その先の感度で観測するためには, 希釈冷凍機を用いて 100 mK 以下の極低温環境で超伝導アンプを量子限界近くで連続的に運転する必要がある。そのため, Phase 3 では, 超大型で強力なマグネットと希釈冷凍機による探索を計画している。大口径で強力なマグネットの例として, 核融合科学研究所で開発された 13 T-700 mm 大口径マグネット [21] が挙げられる (図 15)。このマグネットを利用した場合の感度の予測を図 11 に示した。この大口径マグネットを用いると, 未探索のまま残されている 0.4 GHz 近傍の領域も探索可能となる。さらに, BREAD 実験 [18] で提案されているような, ソレノイド磁石内に金属反射板を設置した dish antenna タイプの装置を用いて, ハロスコープでは不可能な高い周波数領域, 具体的には 50 GHz を超え, テラヘルツの周波数領域への拡張も可能となる。

このように, 大口径で強力なマグネットを利用すると, 魅力的な展開が期待される一方で, その実現には多くの開発要素とそれに伴う巨額の費用が見込まれる。MADMAX 実験では, CERN の協力のもとで専用の, 巨大で非常に強力な双極

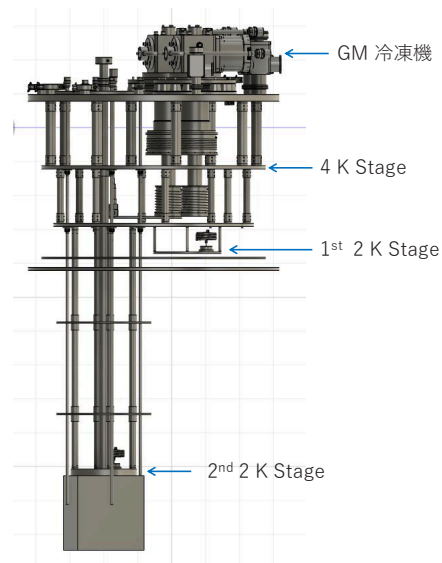


図 14 Phase 2 の超流動ヘリウム冷凍機の家。

子マグネット(ボア径1350ミリ,9 T)を開発している[22]。その一方で,プリンストン大学のグループは,核融合実験炉ITERで開発されたNb₃Sn体を用いて,磁場強度は5 T,ボア体積~500Lものマグネットをアクシオン探索に利用する計画である[23]。また,ADMXは9.4 T,ボア径800ミリのMRI用のマグネットを利用する[24]。われわれEDAMAME実験も,コスト面,技術面で現実的であり,かつ物理探索の上ではエキサイティングな研究を素早く推進できるように,マグネットの開発・研究を急いでいる。

5 まとめ

暗黒物質アクシオンの探索は,素粒子物理学というミクロな観点と,宇宙物理学というマクロの観点と双方から非常に注目されている。本稿で解説したEDAMAME実験は,東北大学を中心とした日本発の探索計画であり,以下の3段階のフェーズを通じて,熾烈な国際競争の中で着実に成果を挙げていこうと考えている。

- Phase1(現在進行中):マイクロ波共振器やKIPAなどの開発・研究を行いつつ,既存のインフラを最大限に活用し,新たな領域の探索を行う。
- Phase2:強力・大口径マグネット,超流動ヘリウム冷凍機を組みあわせ,大型共振空洞と極低雑音アンプを用いて,標準的なアクシオンモデルの感度領域に切り込みを図る。
- Phase3(将来計画):より強力で大口径のマグネットを占有し,希釈冷凍機を用いた極低温環境下で,ベンチマークとなるモデルを探索する高感度化と,dish antenna方式の採用などによる探索周波数領域の拡大を行う。

EDAMAME実験の核は,高周波領域における感度低下という難題に対して,独自のマイクロ波共振空洞の開発,最先端の超伝導量子技術,そして国内の優れた低温・強磁場技術を融合させて挑む点にある。EDAMAMEは,このような多岐に亘るアイデアや技術を取り入れながら段階的に「深化」と「進化」を続け,暗黒物質アクシオンの謎にアプローチする計画である。EDAMAMEの今後の展開にぜひ注目していただきたい。また,本研究に興味を持たれた方からの,著者のもとへご連絡をお待ちしています。

謝辞

本稿を執筆するに当たって,EDAMAME共同研究グループから,資料の提供,原稿へのコメントなど多くの協力を得ました。EDAMAMEは,JSPS科研費24H002239,24H02236,23H03999,21H05446,19H05809,17H02883,東北大学金属材料研究所

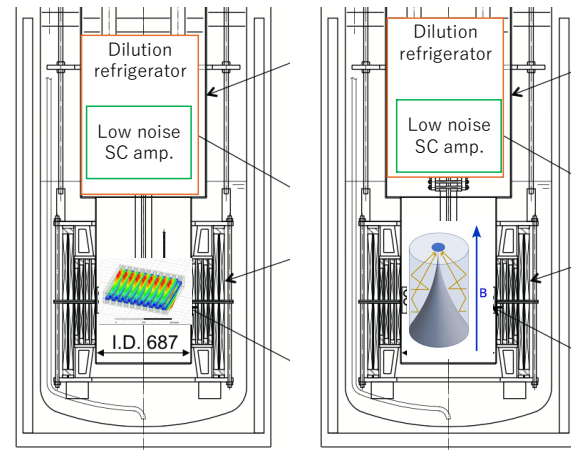


図15 Phase3の概念図。共振空洞を導入したハロスコープ実験(右)に加え,金属反射装置を導入したdish antennaタイプの装置で非常に高い周波数に対応する事も可能である。

共同利用研究 02412-HMKGE-0205 の助成を受けて遂行されています。

参考文献

- [1] C. Abel, et al., Phys. Rev. Lett. **124**, 081803 (2020).
- [2] R.D. Peccei and H. R. Quinn, Phys. Rev. Lett. **38**, 1440 (1977).
- [3] 例えば, L. D. Luzio, et al., Phys. Rep. **870**, 1 (2020).
- [4] <https://cajohare.github.io/AxionLimits/docs/am.html> より
- [5] Particle Data Group, Phys. Rev. D **110**, 030001 (2024)の 89.5節とその中に紹介された参照論文
- [6] P. Sikivie, Phys. Rev. Lett. **51**, 695 (1984).
- [7] Ciaran O'Hare, Axion Limit, <https://cajohare.github.io/AxionLimits/> より
- [8] 例えば, O. K. Baker, et al., Phys. Rev. D **85**, 035018 (2012).
- [9] D. Horns et al., JCAP04 (2013) 016.
- [10] A. Caldwell et al., Phys. Rev. Lett. **118**, 091801 (2017), MADMAX collaboration, Eur. Phys. J. C **79**, 186 (2019).
- [11] J. Liu et al. (BREAD collaboration), Phys. Rev. Lett. **128**, 131801 (2022).
- [12] Y. Kishimoto, et al., PTEP **2021**, 063H01 (2021).
- [13] B., Michael et al., CERN-FCC-ACC-2025-007 (2025).
- [14] H. Yoon et al., Phys. Rev. D **106**, 092007 (2022).
- [15] 柳 長門, 中村 誠, J. Plasma Fusion Res. **100**, 467 (2024).
- [16] 小川 泉 他 EDAMAME collaboration, 日本物理学会2025年春季大会, 19aV2-9
- [17] 時安 敦史 他 EDAMAME collaboration, 日本物理学会2025年春季大会, 19aV2-10
- [18] L. D. Luzio et al., JCAP, **10**, 001 (2021)

- [19] R. T. Co et al., *JHEP*, 2021, 172 (2021).
- [20] S. Frasca, et al., *Phys. Rev. Applied* **21**, 024011 (2024).
- [21] S. Imagawa, et. al. *Plasma and Fusion Research* **10**, 340512 (2015).
- [22] V. Calvelli, et al., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **33**, 4501110 (2023).
- [23] Y. Zhai, et. al., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **35**, 4500205 (2025).
- [24] S. Knirck, Presentation in 19th Patras workshop on Axion, WIMPs and WISPs, <https://agenda.infn.it/event/40078/contributions/240683/>