

動き出した新 QUP

KEK 量子場計測システム国際拠点 WPI-QUP

東 俊行

toshiyuki.azuma@kek.jp

2026 年 5 月 24 日

1 はじめに

量子場計測システム国際拠点（QUP）は、大学共同利用機関法人・高エネルギー加速器研究機構（KEK）をホスト機関とする、世界トップレベル研究拠点プログラム（WPI）の研究センターである。正式名称 International Center for Quantum-field Measurement Systems for Studies of the Universe and Particles が示すとおり、QUP は宇宙と素粒子の研究を目的とした国際研究拠点である。2021 年より、マイクロ波背景放射偏光観測宇宙望遠鏡 LiteBIRD の研究開発を中心とした活動を開始したが、2025 年 12 月に発足した新たなリーダーシップのもと、その研究体制を根本から再検討した。

QUP の設立理念は「人類に新たな“眼”をもたらす」ことであったが、今回の再編では、この理念をさらに発展させ、複数の新たな「Quantum Eyes（量子の眼）」を導入した。その根底にある考え方は、「ダークマター、重力の起源、さらには既存の物理法則の破れといった自然界の最も深い謎は、単に衝突エネルギーを高めるだけでは解明できず、極限的な検出感度に基づく質的に新しいアプローチを必要とする」というものである。

すなわち、QUP は、図 1 に示すように、極めて弱い結合によって特徴づけられる素粒子物理の新領域の開拓を目指している。具体的には、アクシオンを含むダークマ

ターのような未発見粒子の探索、極めて微弱な重力信号の検出、さらには QED, QCD, CPT 対称性を含む標準模型を超える新たな物理法則の探究に取り組む。量子センシング技術を用いた高精度測定を活用することで、これまで主として高エネルギー加速器実験によって探究されてきた物理を、新たな形で検証することを目指している。

この目標を実現するため、QUP では、原子や光子を高精度に制御する原子物理学的手法を基盤とした量子センサーおよび量子デバイスを導入している。これらは、半導体、低温超伝導、微細加工技術など、物性物理学および材料科学に関する知見と融合され、包括的な量子検出器開発へと展開される。また、国内外における分野横断的連携を一層強化することも重要な目的としている。

この構想刷新により、QUP の研究活動は、図 2 に示すように、「基本相互作用と隠れたセクター」「軽いダークマター」「重力」の三つの主要な研究ピラーへと再編された。各ピラーでは、それぞれのフロンティア課題に直接取り組む量子センサーおよび関連基盤技術の研究開発を推進している。

これら三つの研究ピラーを横断的に支えるのが、技術開発プラットフォームである。このプラットフォームは、超伝導転移端センサー（TES: Transition-Edge Sensor）開発グループと、半導体検出器技術グループから構成される。また、理論グループは、探索すべきパラメータ空

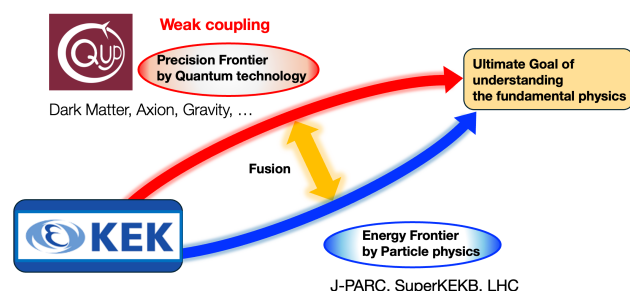


図 1: 新しい QUP は、弱結合現象を探究するための新たなアプローチを確立することにより、素粒子物理学における新たな地平を切り拓く。

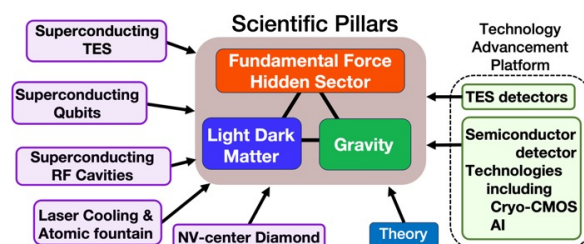


図 2: QUP における研究グループ構成：3 つの主要な研究ピラー、およびこれを支える技術開発プラットフォームおよび理論グループ。

間の同定や感度評価を通じて、すべての実験研究を統合する理論的枠組みを提供している。

実験施設については、当初、KEK つくばキャンパスの富士実験棟を利用して研究活動を開始したが、2025年度に、図3に示すように、大型実験ホールに加え、研究居室や会議室を備えた QUP 実験棟が完成した。QUP で開発する多くの検出器は極低温環境を必要とする超伝導検出器であり、現在、5 台の希釈冷凍機を運用している。このうち1台は、後述する神岡地下実験施設において運用が開始されている。

以下では、それぞれの研究ピラーおよびそれを支える技術開発プラットフォームについて、さらに詳しく述べる。

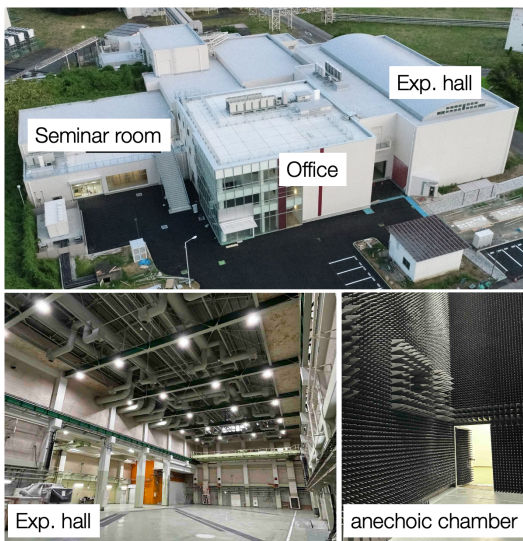


図 3: 2025 年度に完成した QUP 実験棟

2 3つの主要な研究ピラー

2.1 基本相互作用と隠れたセクター

2.1.1 ミューオン原子を用いた QED 検証

量子電磁力学 (QED) は、最も高精度に検証されている量子場理論であり、新粒子の存在を含む標準模型を超えた物理の探索において、精密測定フロンティアを支える理論的基盤となっている。我々は、極めて強い電磁場中での束縛状態 QED (Bound-State QED: BSQED) に注目している。これは、QED 効果が顕著に現れる一方で、従来の摂動論的手法が十分には適用できない理論的困難さを伴うため、長年にわたり大きな注目を集めてきた。東俊行らが率いてきたグループは、最近、負ミューオンが原子核に束縛されたミューオン原子を用いるアプローチを新たに切り拓いた。エネルギー分解能において従来の半導体検出器をはるかに凌駕する超伝導 TES 検

出器と KEK/J-PARC の高強度低速負ミューオンビームを組み合わせることで、原理実証として、ミューオン化ネオン原子から放出されるミュオニック X 線の高分解能分光による QED 検証に成功している [1]。ミューオンは電子に比べて軌道半径が著しく小さいため、その波動関数は原子核近傍、場合によっては原子核内部にまで局在する。これにより、原子核近傍に存在する超強電磁場へ直接アクセスすることが可能となる。QUP では、このアプローチをさらに発展させ、より重い元素のミューオン原子へ対象を拡張することで、本研究プログラムを大きく発展させることを目指している。

2.2 軽いダークマター (アクシオンを含む)

GeV–TeV 領域を対象とする従来型 WIMP 探索は驚異的な感度に到達したものの、これまで確定的な信号は得られていない。こうした状況を受け、現在では研究の重点は低質量フロンティアへと世界的に移行しつつある。そこには、アクシオン、ダークフォトン、その他の hidden-sector 粒子といった有力な理論候補が存在しているが、その質量領域は 30 桁以上にもわたり、依然としてほとんど未踏のままである。この広大な未開拓領域を切り拓くためには、相補的かつ多面的な実験アプローチが不可欠であり、QUP はまさにその必要性に応えるための研究プログラムを構築している。以下に記述する三つの実験は、ダークマターの本質的に異なる現れ方を対象としている。

DarQ 実験および NV Diamond プロジェクトは、振動する場を高精度に検出することで「波動的暗黒物質」を探索する。一方、Kamioka Low-mass Dark Matter (Kamioka-LDM) 実験は、極低温標的中で生じる離散的散乱事象を通じて「粒子的暗黒物質」を探索する。さらに、同じ波動的暗黒物質探索の中でも、DarQ は光子結合チャネル (アクシオン–光子結合 $g_{a\gamma\gamma}$ およびダークフォトンの kinetic mixing ϵ) を対象とするのに対し、NV Diamond 実験はスピン結合チャネル (g_{aee} , g_{app} , g_{ann}) を対象としている。このように、QUP のダークマター研究プログラムは、探索対象・相互作用・観測原理のいずれにおいても多次元的かつ相補的に構成されており、それぞれの実験が代替不可能な物理的意義を有している。

2.2.1 実験 1 [DarQ — 超伝導量子ビットおよびキャビティ共振器]

超伝導量子ビットとマイクロ波キャビティから構成されるシステムは、GHz 帯光子に対する極めて高感度な検出器として機能し、ダークマター探索における最も

有望な手法の一つである。DarQ は、アキシオン-光子変換を探索する実験群に属しており、このカテゴリーには ADMX, BREAD, SQUAD などの実験が含まれる。その中で、DarQ は二つの異なる検出戦略を並行して推進している [2] [3]。

第一の方式である DarQ-Lamb は、ハイゼンベルクの不確定性原理に由来する測定バックアクションを回避しつつ、単一のマイクロ波光子を検出する single-photon counting 技術を用いる。キャビティ型単一光子検出は、現在アキシオン研究コミュニティにおいて最も活発に追究されている方向性の一つである。しかし従来の実験では、周波数可変範囲がわずか約 10 MHz 程度に限られており、探索可能なパラメータ空間を大きく制限していた。このため、周波数可変性を大幅に向上させることが、DarQ-Lamb における中心的開発目標となっている。第二の方式である DarQ-Direct は、DarQ 共同研究グループによって世界で初めて提案された、独創的な検出概念である [4]。従来のキャビティ共鳴を利用した方式とは異なり、DarQ-Direct ではダークマター起源のマイクロ波光子が超伝導量子ビットを直接励起することで検出を行う。そのため、検出原理そのものがキャビティ型とは本質的に異なっている。

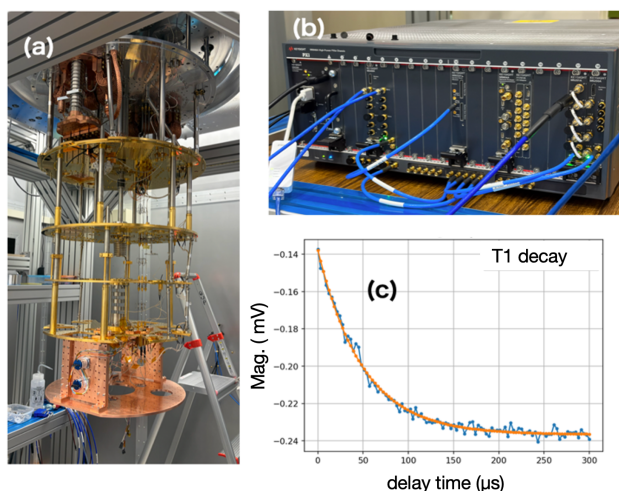


図 4: (a) 設置された Qubit 用の希釈冷凍機。(b) Qubit 測定システム。(c) 作製 Qubit の T_1 decay 曲線 ($T_1=49.4 \mu\text{s}$)。

2023 年 10 月に QUP を中核として設立された DarQ 共同研究は、素粒子物理と量子技術の専門家を結集した共同研究体制であり、QUP では新田龍海氏を中心に研究が展開されている。超伝導量子ビットは通常 RF パルスによって駆動されるため、ダークマター起源の極めて弱いコヒーレント RF 信号によって量子ビットが直接励起される可能性がある。この方式は、既存の量子計算ハードウェアを最小限の改変で活用できる利点を持つ。現在、この方式を追究している他グループは存在してい

ない。図 4 に、QUP で最近立ち上がった超伝導量子ビット実験装置とコヒーレンスを実測した結果を示す。一方で、DarQ-Direct が DarQ-Lamb に匹敵する感度へ到達するためには、多数の量子ビット間エンタングルメントを実現し、量子増強効果を活用する必要がある。これは大きな技術的挑戦であり、QUP ではその最前線研究を推進するため、Fermilab との共同研究を計画している。

2.2.2 実験 2 [NV ダイヤモンド量子スピンセンサー]

DarQ が光子結合チャネルを標的としているのに対し、NV ダイヤモンド計画では、光子ベースの実験では到達できない、アキシオン-フェルミオンのスピン結合チャネル、すなわち g_{aee} (電子), g_{app} (陽子), および g_{ann} (中性子) を対象とする。このため、両プログラムは、質量領域が重複する場合であっても探索する相互作用そのものが本質的に異なっており、科学的に重複しない相補的な関係にある。NV ダイヤモンド計画は、 $10^{-22} \sim 10^{-6} \text{ eV}$ (μHz 以下から MHz を超える領域) をカバーする。ダイヤモンド中の窒素空孔 (NV) 中心は、長い量子コヒーレンス時間に加え、固体デバイスとしての高い堅牢性および優れた拡張性を兼ね備えていることから、有望な量子センサーとして注目されている。QUP と京都大学の共同研究グループは、NV 中心を用いたアキシオンダークマター探索を初期段階から提案してきた先駆的研究グループの一つである。本実験は、QUP の Ernst D. Herbschleb 氏および梅本篤宏氏が主導し、水落憲和氏 (京都大学化学研究所, QUP 連携研究者) との緊密な連携のもとで推進されている。QUP の低温量子センシング基盤と、京都大学が有する世界最高水準のダイヤモンド結晶成長技術を組み合わせたこの機関間連携は、本プロジェクトの中核を成している。

2.2.3 実験 3 [Kamioka-LDM — 極低温地下ダークマター探索]

DarQ や NV ダイヤモンド実験がコヒーレントな波動的暗黒物質場を検出対象としているのに対し、Kamioka-LDM 実験では、ダークマター粒子が極低温ターゲット中の電子あるいは原子核にエネルギーを付与する散乱事象を探索する。本実験は、Maurice Garcia-Sciveres 氏 (LBNL, QUP PI), 長谷川雅也氏, および石徹白晃治氏 (東北大学, QUP 連携研究者) によって主導されており、装置は神岡地下実験施設の KamLAND エリア内に設置されている。対象とする質量領域は MeV~GeV であり、これは従来型の大型液体希ガス検出器の感度が低下する領域に相当する。GeV 以下では原子核反跳エネルギーが検出閾値を下回るため、さらに MeV 領域へ到達するためには、サブ meV 級のエネルギー閾値を持

つ電子励起あるいは格子振動モードとの結合を利用する必要がある。

本プロジェクトは二段階構成で進められている。第1段階では、地下実験環境における実験基盤を確立し、比較的短期的に実現可能な技術を用いて初期の物理成果を得ることを目的とする。続く第2段階では、超伝導アルミニウムターゲットと RF 多重化読み出し技術を導入することで、現行感度を大きく超える決定的なダークマター探索を目指す [5]。第1段階は TES 検出器を用いた光子読み出しによるシンチレーション GaAs 結晶ターゲット実験を主実験として採用する方針である。図5に、その検出感度、およびレーザーを用いた単一光子読み出しの結果を示す。ここで開発される光子ベースの GaAs 読み出しアーキテクチャは、第2段階におけるアルミニウムターゲットのフォノン読み出しへ直接応用可能であり、技術開発として連続性を有している。

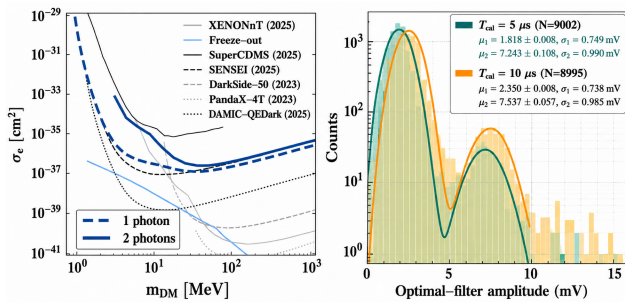


図 5: 左: 第1段階の GaAs 結晶 (2.3 g, 7 日間) によって期待される電子リコイル型ダークマター感度。XENON1T, SuperCDMS, SENSEI, および DAMIC-QEDark と比較。右: 一様光照射条件下で測定された単一 TES のパルス振幅ヒストグラム。左ピークは TES に入射するフォノンエネルギーに対応し、右ピークは TES に直接入射する単一 3 eV 光子に対応する。比率は単一光子検出に使用できることを示している。

2.3 重力

重力は依然として最も理解の進んでいない基本相互作用であり、QUP では、VUV レーザー冷却や高 Q 値 RF キャビティなどの先端技術を用いて、これまでにない感度で重力を探究する二つの研究プロジェクトを推進している。これらのプロジェクトは、個々の実験成果にとどまらず、QUP に長期的に蓄積される技術基盤を構築するものであり、同分野を追究する他グループが容易には再現できない研究基盤の形成につながっている。

2.3.1 反物質重力研究

反物質と通常物質の重力相互作用を精密比較すること

は、弱い等価原理の根本的検証に相当する。近年、反物質の重力加速度の符号自体は測定されたものの、通常物質との精密比較は未だ実現されていない。本プロジェクトは、その将来的な精密測定を可能にする基盤技術の開発を目的としている。中心的技術課題は、121 nm に位置するライマン α (Ly- α) レーザーの狭線幅化である。この波長域には市販レーザー光源が存在しない。KEK は、ミュオンビーム応用のために開発された世界最高出力級の Ly- α レーザー (30 μJ /パルス) を有しているが、その線幅 (約 80 GHz) は反水素や水素のコヒーレント制御には広すぎる。QUP の中核的貢献は、十分な出力を維持したまま、この線幅を約 800 分の 1 に狭めることにある。本プロジェクトは、CERN・ALPHA 実験を通じて反水素生成の専門知識を有する藤原真琴氏が、カナダ TRIUMF より QUP に着任して主導している。QUP は狭線幅 Ly- α レーザーを開発し、世界初となる水素原子ファウンテンの実現を目指す。一方、KEK は既存のレーザー基盤および J-PARC ビームラインを提供する。完成したシステムは、将来的に TRIUMF に展開され、反水素干渉計や直接的重力測定へと発展することが期待されている。

2.3.2 超伝導 RF キャビティを用いた重力波検出

MHz~GHz 帯域の高周波重力波は、LIGO や KAGRA では到達できない未踏の周波数領域である。宇宙論的相転移や原始ブラックホールなどに由来する信号の可能性が理論的に示唆されている一方、直接的な実験制限は未だ存在しない。QUP は、この領域で動作する初の検出器プロトタイプを構築し、新たな周波数窓における感度データの取得を目指している。QUP では、二つの相補的検出方式を進めている。第一は、久保毅幸氏 (KEK, QUP 連携研究者) らが提案した結合型超伝導キャビティ方式であり、重力波によるキャビティ壁の微小変位を利用して反対称モードに信号を生成する。第二は逆ゲルツェンシュタイン効果を利用する方式で、強磁場中のキャビティ内で重力波をマイクロ波光子へ変換する。この方式は、QUP のアクシオンダークマター探索と技術的シナジーを有している。

両方式に共通する鍵はキャビティ品質係数 Q であり、感度は Q に比例して向上する。そのため、ミケルビン温度・テスラ級磁場下で $\geq 10^9$ を実現することが中心課題となる。KEK は超伝導 RF キャビティ開発で長年の実績を有し、ILC 向け表面処理や Nb_3Sn コーティングなど独自技術を蓄積している。最近では、加速器グレード表面処理を施したニオブキャビティで、20 mK 以下において $Q \geq 3 \times 10^9$ を達成した [6]。さらに Nb_3Sn コーティング形成と 1 T 磁場下での評価にも成功しており、本アプローチの技術的実現可能性を示している。

2.4 技術開発プラットフォームおよび理論グループ

2.4.1 TES 検出器研究グループ

TES 検出器は、QUP 設立当初から中核的な研究課題として位置付けられてきた。これまでに、太陽アクシオン探索用 TES 検出器や、ダークマター探索向け光学 TES 検出器の研究開発が進められ、重要な科学的・技術的マイルストーンを達成している。一方で、読み出し多重化などの高度な機能を実現し、さらなる発展を遂げるためには、より統合的かつ一貫した開発戦略が不可欠であることが明らかとなった。このため、従来個別に進められていた研究活動を再編し、山崎典子氏を中心に TES 検出器研究グループとして再構築した。これにより、技術開発の効率化、内部シナジーの強化、ならびに QUP 全体の科学目標と整合した明確な戦略的方向性が確立されている。加えて、Berkeley サテライトは、TES 検出器の作製および組み上げを基盤とし、Kamioka ダークマター計画を支える共同研究ネットワーク形成と人材育成を重視した研究体制に移行している。

2.4.2 半導体検出器技術研究グループ

半導体検出器および低雑音読み出し電子回路は、QUP の量子計測研究を支える基盤技術である。QUP は、日本・欧州・米国の主要研究拠点を結ぶ強固な国際ネットワークを有している。高橋忠幸氏は宇宙 X 線・ガンマ線観測機器開発で豊富な実績を持ち、外川学氏は KEK および CERN の半導体検出器研究を牽引している。極低温検出器や超伝導量子システムに不可欠な低雑音読み出し技術については、Cryo-CMOS を含む低雑音電子回路に関する宮原正也氏の専門性を基盤として高度化を進めている。さらに、CERN および欧州検出器コミュニティと強い連携を持つ PI D. Bortoletto 氏の参画により、QUP の国際的研究体制は一層強化されている。また、新たな量子場現象の探索では高度なデータ解析が重要であり、ATLAS 実験などで培われた人工知能・機械学習技術を、実験データ解析や検出器応答モデル構築へ応用している。これらは中浜優氏を中心に推進されており、信号抽出性能の向上や複雑な計測データの高精度かつ効率的な大規模解析を可能にしている。

2.4.3 理論グループ

中山和則氏 [7] および Volodymyr Takhistov 氏が率いる理論グループは、これまで観測不可能であった現象に到達するために探索すべき物理量およびパラメータ空間を理論的に特定するとともに、新たな検出原理や探索

戦略の構築を主導することで、QUP における実験研究に不可欠な知的基盤を提供している。実験グループとの密接な相互作用のもと、同グループは、到達可能な測定感度や発見可能性に関する議論を主導している。これらの取り組みは、特に神岡地下実験および NV ダイヤモンド量子センサーを用いた測定において、顕著な貢献をもたらしている。

3 まとめ

このように、新たに始動した QUP からは多様な成果が期待されている。既に魅力的な成果が現れ始めている実験もある一方で、検出器開発には地道かつ着実な研究開発の積み重ねが不可欠である。そのための研究開発プラットフォームが立ち上がりつつあることの意義は大きく、将来的には日本における検出器開発の国際的ハブとして重要な役割を果たすことが期待される。

最後に、QUP の KEK における位置付けと役割について述べたい。特に強調したいのは、QUP が KEK の量子研究戦略を牽引する中核的エンジンとして機能し、量子科学・量子技術を統合した新たな研究領域の形成に貢献することが期待されている点である。大学共同利用機関として大規模国際実験を受け入れ、主導してきた KEK の豊富な経験を基盤として、QUP は「新しい量子の眼」をもたらすと同時に、「新しい風」を KEK、さらに高エネルギー物理学分野にもたらす存在でありたいと考えている。

参考文献

- [1] T. Okumura *et al.*, Phys. Rev. Lett. **130**, 173001 (2023).
- [2] DarQ Collaboration, <https://sites.google.com/view/darq-experiment/>.
- [3] 陳詩遠, 新田龍海, 高エネルギーニュース **44**, 87 (2025).
- [4] S. Chen *et al.*, Phys. Rev. Lett. **131**, 211001 (2023).
- [5] M. Chen *et al.*, Phys. Rev. D **113**, 036006 (2026).
- [6] T. Takenaka, *et al.*, Phys. Rev. Applied **25**, 034076 (2026).
- [7] 中山和則, 高エネルギーニュース **44**, 41 (2025).