

■会議報告

QUP workshop 報告

KEK 量子場計測システム国際拠点

赤松 弘規

hirokia@post.kek.jp

KEK 量子場計測システム国際拠点/

素粒子原子核研究所

長谷川 雅也

Masaya.hasegawa@kek.jp

2025 年（令和 7 年）5 月 10 日

1 はじめに

2025 年 4 月 8 日から 10 日にかけて、高エネルギー加速器研究機構・小林ホールにてトピカルワークショップ「QUP workshop」が開催された（図 1）。QUP[1]は「人類に新しい眼をもたらし」をテーマに、革新的な計測技術の開発とそれを活用した科学研究を推進する国際研究拠点として、2021 年 12 月に同機構内に設立された。今回のトピカルワークショップでは、低温検出器および量子センサー技術を用いた未知の量子場の探索や重力の研究に焦点を当て、QUP の現在の取り組みや今後の研究の方向性について活発な議論が交わされた。国内外から約 110 名の研究者がハイブリッド形式で参加し、3 日間にわたり熱のこもった議論が交わされた。関連分野に関する招待講演・一般講演に加え、若手研究者や学生によるポスターセッション(図 2)も実施され、参加者同士の貴重な意見交換の場となった。一般講演の一部を除き、講演時間は 30 分に設定され、各講演では十分な質疑応答の時間が確保された。研究会のプログラムおよび講演資料は、以下のリンクから参照可能である。

<https://conference-indico.kek.jp/event/317/timetable/>



図 1 会議参加者の集合写真

2 冷却=量子効果への近道？

後に述べるように、本研究会では極低温まで冷却した後には動作するセンサーをテーマの一つとして扱っている。冷やすことでどのようなご利益があるのだろうか？この問いに、真っ向から答えると、“冷却することで、熱的揺らぎを抑えて量子状態が観測可能になる”である。第一に、常温



図 2 ポスターセッションでの議論の様子

では粒子（電子・原子・フォノンなど）が熱エネルギーによって高い励起状態に常に移動しており、量子状態の繊細な性質が熱雑音に埋もれて見えにくくなっている。冷却により、粒子が基底状態（最低エネルギー）にとどまりやすくなり、量子準位や超伝導、スピン状態などが明瞭に観測できるようになる。

次に、高温ではフォノンや電磁場との相互作用が激しく、量子重ね合わせやエンタングルメントが壊れやすい。量子系を冷却することにより、量子状態を長時間安定に保持することが可能となる。

最後に、極低温に冷やすことにより、絶対零度に近い温度でのみ観測可能な超伝導など低温でしか現れない量子現象にアクセスすることができるようになる。実際に、QUP では、超伝導の転移現象を利用した超伝導遷移端温度計型 (Transition Edge Sensors: TES) センサーの開発、応用をテーマの一つに据えている。

以上のように、極低温に冷やすことで、熱によるクラシカルな揺らぎを抑え、量子力学的な性質が支配的となる条件を整えることができる、つまり、量子効果を観測する近道であるということができる。

本研究会では、冷やすだけでない量子効果を用いた研究も活発に議論され、QUP の主たる研究分野である“量子場”の広がりを見せていると考えている。今後、QUP において、各々の量子効果の専門家、KEK における高エネルギー物理の専門家が、混ざり合い、アイディアを出し合い、意見を戦わせ、新しい研究分野を創出してゆくと考えている。

3 研究会の主なトピックと議論

QUP では現在「低温検出器 (主に TES)」「量子センサー」「半導体検出器」の 3 本柱を軸に研究を進めており¹、今回のワークショップでは、このうち前者 2 つのテーマに焦点をあて、集中的な議論が行われた。

会議初日の午前中は、オープニングトークに続き、中山氏より「量子計測技術を用いた軽い暗黒物質探索」に関する講演が行われた。近年 O(eV)以下の“波状(wave-like)”暗黒物質が候補として注目されている。これらの生成には初期宇宙の現象と関係する物もあり、初期宇宙をさぐるツールとしても注目されている。Dilaton/Axion/Dark photon 等様々な候補が提案されており、磁場中での光子への転換、物質中での吸収などを通して探索される。講演では軽い暗黒物質の相互作用、準粒子を用いた探索方法、さらには量子技術を用いた新たなアプローチまで、QUP の今後の活動も含めて広範囲にわたる内容が、実験研究者にも理解しやすい形で簡潔にまとめられた。

午後のセッションでは、QUP における TES 開発現状に関する報告とともに、TES を用いた QUP のプロジェクトである「神岡暗黒物質プロジェクト(Kamioka-DM)」および「太陽アクシオン探索」についての講演が行われた。Kamioka-DM は、超流動ヘリウムを標的として使い、量子蒸発現象による信号を TES を用いて検出する実験である。第 1 観測フェーズでは HeRALD 実験のセンサー[2]を用いて、0.1 GeV 領域の暗黒物質を探索する。すでに昨年度、希釈冷凍機が神岡鉱山内に設置され、コミッショニングを経て、まもなく観測が開始される予定である。太陽アクシオン探索は、太陽で生成されたアクシオンを ^{57}Fe で吸収し、14.4 keV の γ 線として検出する事を目指した実験である。 γ 線に感度を持つ TES を用いて、従来の半導体センサーを用いた実験よりも高いエネルギー分解能で測定し S/N 比を向上させる点が新たな取り組みである。1000 素子を用い 100 日間の観測で ~150 eV までの質量領域の探索を目指している。実現のために「磁性体の近くでの TES の運用」「(統計感度を向上させるため)多重化読み出し技術の確立」が主な課題となる[3]。続けて、鈴木有春氏から LBNL で行われている超伝導デバイス・低温技術開発と QUP で進められているプロジェクトとの技術的なシナジーについて解説があった。例えば CMB 観測用の TES 開発で培われた技術が、QUP で開発を進めている暗黒物質探索用の可視光 TES の製作に活かされる点や、量子ビットの読み出しに用いる低温増幅機器 (パラメトリックアンプ) の開発、振動による外乱の抑制技術の開発など、今後の共同研究による相乗効果が強調された。

¹ QUP ではその他に検出器開発の各活動を発展的に関連付けるための“人工知能(AI)”, “理論”研究も盛んに行っている。

会議 2 日目は量子センサーに関連した講演が中心となった。Aaron Chou 氏による、量子ビットと量子情報処理の素粒子物理への応用 (主に米国での取り組みを中心とした紹介)、新田龍海氏による量子ビットを用いた暗黒物質探索計画、藤原真琴氏による反物質を用いた重力実験などが議論され、日本の高エネルギー研究者にとって新鮮かつ刺激的な内容となった。これらに続き、NV ダイアモンドを用いたアクシオン探索[4]や、カシミール力の精密測定[5]など、QUP が現在進めているプロジェクトの現状と展望についても報告され、活発な議論が交わされた。

最終日には、電子[6]・イオントラップ、原子核時計、メスバウワー効果の基礎物理への応用など[7]、量子計測技術に関する多様な研究が紹介され、幅広い視点からの意見交換が行われた。

閉会にあたり、東俊行氏よりクロージング講演が行われた。講演では「New directions in science are launched by new tools much more often than new concepts」と、フリードマン・アイソンの有名な言葉を引用しつつ「検出器や計測手法で新たな科学の『頂上』と『地平』を切り拓く」という QUP の新たなコンセプトが紹介された。TES を用いた物質分析への応用や、生体イメージング検出器の開発、コンプトンカメラによる放射線応用など、今後の展開が期待される具体的な応用例が紹介され、研究会を締めくくった。

4 おわりに

QUP workshop は低温検出器および量子計測を用いた基礎物理に関する最新の研究成果を共有し、異分野間の連携を深める貴重な機会となった。今後も、QUP はこのような研究会を (半) 定期的に開催し、研究コミュニティの発展および若手研究者の育成に貢献していく予定である。最後に、本ワークショップの企画段階からご尽力いただいた LOC の皆様、準備を支えてくださった QUP 事務室の皆様、そして年度初めの慌ただしい時期に、素晴らしいご講演をいただいた講演者の皆様、さらにはご参加頂いたすべての皆様に、心より感謝申し上げます。皆様のおかげで、本研究会を無事成功裏に終えることが出来た。

参考文献

- [1] 量子場計測システム国際拠点 (QUP)
www.2.kek.jp/qup/
- [2] R. Anthony-Petersen et al., Phys. Rev. D110, 072006 (2024)
- [3] Y. Yagi et al., JLTP 211, 255-264 (2023)
- [4] S. Chigusa et al., J. High Energ. Phys. 2025, 83 (2025)
- [5] Y. Ema et al., Phys. Rev. D108, 016009 (2023)
- [6] X. Fan et al., Phys. Rev. D111, 075022 (2025)
- [7] G. Gratta et al., Phys. Rev. D102, 115031 (2020)