

大学院教育支援機構 企業寄附奨学制度（DDD） 報告書

氏名	松平 広康
研究科・専攻	理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻
修士/博士・学年	修士 1年
支援企業名	日本ガイシ株式会社

・提出期限：2024年3月29日（金）17:00

・ページ数に制限はありません。

・写真や図なども組み込んでいただいて結構です。

・各項目について具体的に記述してください。

奨学金を得て行った研究の成果

◆ イントロダクション

私は今年度、電子の質量が実効的に重くなる、「重い電子系」と呼ばれる物質についての研究を行った。電子の見かけの質量（これを有効質量という）は電子のおかれた状況によって変化する。なぜなら電子の有効質量とは電子の物質内での動きやすさのことであり、電子が動きにくい場合、有効質量は大きくなり、逆に電子が動きやすい場合、有効質量は小さくなるからである。電子が重くなる要因として、主に(A)近藤効果と(B)揺らぎの効果が挙げられる。

A) 近藤効果について

量子力学の世界で、電子は波としての側面と粒子としての側面を持つ。電子が波であるのか、粒子であるのかはその電子がおかれた状況によって変化する。金属の中には波としての側面が強い電子と、粒子としての側面が強い電子の両方が存在する。金属の伝導性（電気を流す性質）を担う伝導電子は波としての側面が強く、物質内を自由に動き回っている。金属の原子核の周りをまわっている f 電子は粒子としての側面が強く、高温では原子核の周りに局在する。しかし温度を下げていくと f 電子は波としての性質が強まり、伝導電子と混ざり合い、物質内を自由に動き回るようになる（近藤効果）。ただし、物質内を動き回る f 電子は粒子としての性質も保持している。それゆえ、二つの f 電子が同一の場所にいると大きなクーロン斥力が働く。これを避けるために、 f 電子たちは互いを避けて物質中をゆっくりと移動し、重い電子を形成する。

B) 揺らぎの効果について

伝導電子のエントロピー（揺らぎの大きさ）は電子の有効質量に比例する残留比熱 γ を用いて $S = \gamma T$ と書かれる。絶対零度付近で大きな揺らぎが存在する場合は、小さい T の下で S が大きくなるため、 γ は特に大きくなければならず、従って電子の有効質量も非常に大きくなる。このように低温での揺らぎは電子の有効質量を増大させる。

このように電子が重くなる系を重い電子系という。

◆ 研究内容・成果

私は、J. G. Sereni らの比熱測定によりゼロ磁場下において γ が 7.5 J/mol K^2 であると報告された YbCu_4Ni に着目した。この値は通常の金属の数千倍、重い電子系の数倍に匹敵し、低温で通常の重い電子よりもさらに大きな有効質量を持つ、超重い電子が形成されていると考えられる。このような巨大な γ は A) 近藤効果だけでなく、B) 大きな揺らぎの存在も示唆している。こうした大きな揺らぎは、複数の揺らぎが共存することで実現していると考えられる。これを確かめるため、私は微視的に電子の揺らぎを観測する手法である、Cu 核の核四重極共鳴（NQR）測定を行い、以下の二点を明らかにした。

① 揺らぎが低温で急速に増大すること。

物質中の Cu 原子核（以下、Cu 核と呼ぶ。）は図 1 に示すように全体的に正の電荷を帯びたラグビーボールのような形をしている。そのため Cu 核は向きによって安定性が異なる。通常の状態では安定な向きをとっている Cu 核の数が多い。NQR 測定では図 1 のように電磁波を入射させることで Cu 核の向きを変えた後、Cu 核が電子とのエネルギーのやり取りによってエネルギーを放出しながら向きがもとに戻るまでにかかる時間を観測する。この Cu 核の向きが元に戻るまでの時間を T_1 という。それゆえ T_1 は、倒れた Cu 原子核の向きがもとに戻るのに時間がかかる場合には大きくなり（逆数の $1/T_1$ は小さくなり）、すぐに向きが戻る場合には小さくなる（ $1/T_1$ は大きくなる）。原子核の主なエネルギーのやり取り先は電子であるので、 $1/T_1$ は電子の揺らぎの大きさと対応する。図 2 に示すように $1/T_1$ は温度を下げると大きくなっていることから、低温で電子の揺らぎが大きくなるのがわかる。

② NQR 測定で観測された揺らぎが電気的であること

NQR によって観測される揺らぎは、電磁気的な相互作用と磁気的な相互作用の二種類の相互作用により生じている。Cu は ^{63}Cu と ^{65}Cu の二種類の同位体があり、これら二つの同位体が感じる $1/T_1$ の値は異なる。これら二つの値の比を見ることによって、NQR で観測された揺らぎが電気的なものなのか、磁気的なものなのかを判別することが可能である。この手法により、私は YbCu_4Ni において観測された揺らぎは主に電気的であることを突き止めた。

①については同様の振る舞いが磁気的な揺らぎを観測する μSR 測定でも観測されている。②については、通常 NQR で観測されている揺らぎは磁気的であることが多く、電気的な揺らぎを持つ物質は珍しい。 μSR 測定で大きな磁気的な揺らぎが観測されていることを踏まえれば、 YbCu_4Ni は低温で電気的な揺らぎと磁気的な揺らぎの両方を有していることがわかる。このことは、協奏的な複数の揺らぎが超重い電子系を実現していることを示唆している。

産学協同の取組における成果

産学協同の取組みとして、①研究発表および座談会と②工場見学を行った。

① 研究発表および座談会について

日本ガイシの方々や本奨学金に関心のある学生の方々（8 名程度）に対して自身の研究についてのプレゼンテーションを行った。学会や研究室以外で自身の研究内容を発表する機会は少なく、今回の研究発表は前提知識を共有していないの方々に対して発表を行う貴重な機会となった。発表に際して、自身の研究内容を平易な言葉で伝えるために、スライドを試行錯誤して作成したことは今後の研究活動において求められるアウトリーチ活動の糧になると考えている。

さらに座談会では企業担当者と大学院生の間で闊達な議論が交わされた。不安定な国際情勢、刻々と変化してゆく顧客のニーズ、そして脱炭素社会の必要性の高まりなどの、日々流転してゆく状況の中で、企業は

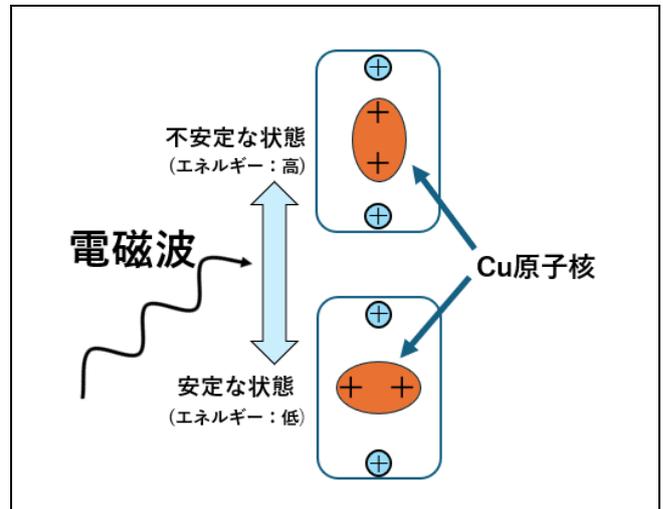


図 1. NQR 測定概念図。Cu 原子核は図中に示す世にラグビーボール形をしており、電磁波の入射によって向きを変える。

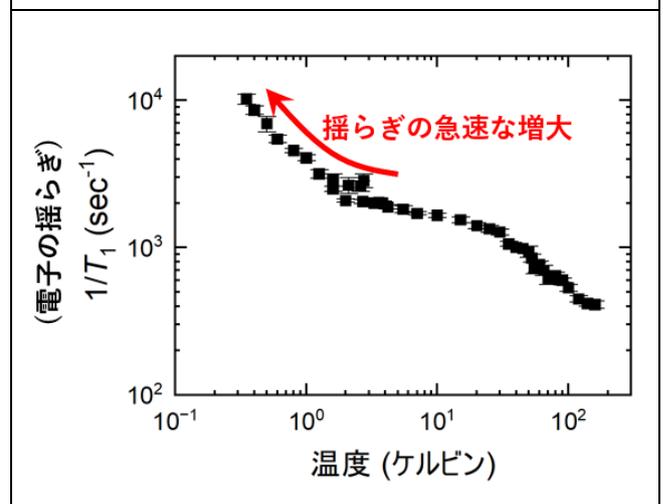


図 2. YbCu_4Ni におけるスピンの揺らぎに対応する核スピン-格子緩和率 $1/T_1$ の温度依存性。低温で揺らぎが特異的に増大している。

技術的変革をもたらす人材を渴望していることが分かった。企業の中でそのような変革をもたらすために、我々は大学院で何を獲得することが求められているのだろうか？議論を通じて、この座談会ではコアになる自身の技術プロセスを確立することが重要であるということ結論に至った。ここで言う技術プロセスとは、自身の目の前にある課題に取り組むことで自分の技術を身に付け、磨いてゆく姿勢のことである。大学院とは研究のプロフェッショナルである教授陣の背中を見ながら、自身の課題に取り組むことで研究者としての研鑽を積む場所である。それゆえ、大学院は自分なりのコアとなる技術プロセスを体得するのに最適の場所であり、今後も大学院で自身の研究を究めてゆくことを通じて、アカデミアでも社会でも通用する普遍的なスキルを身に付けようと思いを新たにした。

② 工場見学について

私が所属する固体量子物性研究室の希望者（私の他 8 人）と一緒に、工場見学（図 3）と京大 OB との座談会をさせていただいた。製品紹介では日本ガイシの製品の説明を受け、日本ガイシの有する技術力の高さを実感した。工場見学では、現場でどのようなテクノロジーが生かされているのか、また近年注目されているテクノロジーである AI が実際の現場でどれくらい生かされているのかといったことを知ることができた。工場は機械化されていて人間が実際に介入することは少ないという固定観念を抱いていたが、実際には人間の感覚や、熟練した技術と機械の共同作業で高い品質を持つ製品が安定して生産されているということを実感した。

京大 OB との座談会では、企業での研究と大学での研究の違いや共通点を知ることができた。企業では期限とコストという二つのファクターがとても大切になってくるということが印象的であった。また最初の製品紹介でも感じたことであるが、より会社を発展させ、社会により貢献するためには他の企業や研究機関との競争＝協創が大変重要であるということがわかった。こうした学びは博士号取得後に就職しようと考えている私にとっては大変貴重であった。ここで得た知識や経験を活かして大学院で一生懸命研究に励もうと決意した。以上の取り組みによって、「企業とアカデミックのギャップを埋める」という側面において産学共同の取り組みの目標を果たすことができた。



図 3. 工場見学での記念写真。
写真中央の人物が私である。
大変楽しいイベントでした。

今後の展望

① 研究の展望について

今年度の研究では、低温下で YbCu_4Ni が持つ非常に大きな残留比熱は複数種類の量子揺らぎが共存することによって実現していることを示唆する結果が得られた。しかし、これらの量子揺らぎの起源が何であるのかは未だ解明されていない。それゆえ、今後の研究においては Cu と Ni の組成比の変更や不純物の導入、磁場の印加などによって、 YbCu_4Ni の量子揺らぎがどのように変化するのかを調べることで、 YbCu_4Ni の揺らぎの起源を完全解明することを目指す。

加えて、私が研究している YbCu_4Ni は磁気冷凍への応用が期待されている物質である。磁気冷凍は磁場の変化を利用して物質の温度を下げる技術である。昨今は量子コンピュータの研究開発に際して 1.5 K 以下の極低温を実現することが不可欠となっている。このような極低温への冷却は、極めて高価な ^3He という希少な種類のヘリウムを用いる希釈冷凍機が必要である。加えて希釈冷凍機は複雑な装置であり、大変高価である。一方、磁気冷凍の装置は構造が単純であり、磁気冷凍で極低温を実現できれば、量子コンピュータの研究開発費を大幅に削減できる可能性がある。したがって、磁気冷凍による極低温の実現は非常に重要な課題である。 YbCu_4Ni の大きな比熱の起源を完全解明することは、より大きな残留比熱を持つ物質の合成への知見を得ることにつながり、極低温を実現する磁気冷凍デバイス開発の基礎を築くことができる。

② 私のキャリアパスについて

①で述べた研究を行うために博士課程へ進学することを考えている。博士号取得後は、自身が大学院で培った研究能力を社会へ還元するために、企業就職し研究・開発職に携わりたいと考えている。