

MERIT 長期海外派遣 報告書

新領域創成科学研究科 物質系専攻 博士1年

六本木 雅生

概要

今回、2022年6月12日から7月23日にかけてカナダのブリティッシュコロンビア大学(University of British Columbia : UBC)に滞在し、附属の実験施設 TRIUMF にて、ミュオンスピン回転共鳴(μ SR)実験を行った。また、7月18日から22日には国際会議 M²S (The International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity & High-temperature Superconductors)がバンクーバーにて開催されており、筆者らはそこに参加し、口頭発表を行った。本報告書ではこれらの詳細について報告する。

ブリティッシュコロンビア大学・TRIUMF での μ SR 実験

我々のグループでは非従来型超伝導体における超伝導発現機構や新たな超伝導状態の解明を目的とし、様々な超伝導体の精密測定を行っている。その中でも、時間反転対称性の破れた超伝導はトポロジカル超伝導の一種であり、量子コンピュータなどへの応用が考えられており、近年大きな注目を集めている。また、我々のグループのメインテーマの一つである鉄系超伝導体は銅酸化物高温超伝導体と並び、高温超伝導を示す代表的な非従来型超伝導体の一つであり、



図1 TRIUMF にて共同研究者の皆様と

高温超伝導以外にも磁性、トポロジカル物質、電子ネマティック状態(電子が格子系の回転対称性を破った状態)など多彩な相を有する物質としてここ10年ほどで様々な研究がなされている。

μ SR法はミュオンという素粒子を用いて、ミュオンのスピンの感じる物質の内部磁場の大きさや揺らぎを実時間で捕らえることができる方法であり、超伝導状態における時間反転対称性の破れに起因して生じる微小な自発磁化もこの方法により検出することができる。実際に我々のグループでは以前、鉄系超伝導体 FeSe および Fe(Se,S)に対して μ SR法を用いて実験を行い、超伝導状態において時間反転対称性の破れに起因する内部磁場の検出に成功している。さらに横磁場を印加し、Transverse magnetic field (TF)- μ SRによる磁場侵入長測定を行い、FeSe と Fe(Se,S)における超伝導電子密度の変化を比較した結果、Fe(Se,S)では超伝導状態においてフェルミ面が一部残っており、近年理論的に提案された

Bogoliubov Fermi surface という今までにない新たな超伝導状態が実現していることを明らかにした。

これに対し、今回、我々は同じ FeSe 系超伝導体である Fe(Se,Te) に対し、 μ SR 法を用いて実験を行った。我々の所属研究室では、世界で初めて Fe(Se,Te) の低 Te 置換領域の純良単結晶合成に成功しており、Fe(Se,Te) において Fe(Se,S) で見られた新奇な超伝導状態が実現しているかを確かめるべく、以下に示すように実験を行った。

今回は初めに 6 月 14~19 日にビームライン M20 において 2-100K までの測定を行った。測定としてはまず初めに FeSe_{0.7}Te_{0.3} 試料での測定を行ったが、最初の測定では試料の量が少ないことに起因してほとんどシグナルが見えなかった。その後、同組成の試料を追加した結果シグナルが検出でき、特に Zero magnetic field (ZF)- μ SR の測定では FeSe_{0.7}Te_{0.3} 試料において時間反転対称性の破れに起因する内部磁場を検出することに成功した。また、TF- μ SR 測定から磁場侵入長を測定し、そこから超伝導電子密度の温度依存性を得ることができた。その結果、FeSe_{0.7}Te_{0.3} 試料ではフルギャップである *s* 波超伝導状態に近い超伝導ギャップ構造が実現していることが示唆された。次に 7 月 5 日~12 日かけてビームライン M15 にて希釈冷凍機を用いた 20mK-8K(16K) までの測定を行った。M15 における実験は試料への熱伝導を担保するために、試料を銀のプレート上に張り付けて行うためバックグラウンドが非常に大きくなる。また、希釈冷凍機内に設置された超伝導マグネットによる残留磁場の影響から ZF- μ SR の測定から自発磁化の検出を行うのは非常に難しい。そのため、M15 では主に TF- μ SR の測定を行った。こちらのビームラインでは実際に測定を行った順に FeSe_{0.3}Te_{0.7}、FeSe_{0.7}Te_{0.3}、FeSe_{0.4}Te_{0.6} の 3 つの組成の試料に対して TF- μ SR 測定を行い、磁場侵入長から超伝導電子密度の温度依存性を得た。その結果、これらすべての試料においてフルギャップである *s* 波超伝導状態を示唆する温度依存性を得た。これらの結果に関しては本報告書執筆現在、詳細な解析および考察を進めており、今後、追加実験を行った後に論文にまとめる予定である。

上述の我々のグループのマシントime以外の時間は他グループの測定およびその結果に関する議論に参加した。他グループの測定物質は電荷秩序を示す Mott 絶縁体 Ba(Co,Ni)S₂、カゴメ磁性体 (Co, Fe)₃S₂Sn₂、強磁性体 Mott 絶縁体 (Y,Ca)TiO₃ などがあり、我々のグループの研究対象とは異なる系での物理を学ぶ良い機会となった。また、筆者自身、滞在前は英語での議論を行った経験がほとんどなく自信がなかったが、今回の滞在期間で何度も議論を行い、終盤は英語で自分の意見や疑問点をより正確に伝えられるようになるなど、英語での議論に対して自信がついた。

国際会議 M2S への参加

7 月 18 日から 22 日には国際会議 M²S (International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity & High-temperature Superconductors) がバンクーバー・カナダプレイスにて開催された。今回筆者はカゴメ格子系超伝導における超伝導対称性に

関する研究結果について口頭発表を行った。筆者自身、修士課程は新型コロナウイルスの影響を最も受けた時期であったため、今まで参加した学会はすべてオンラインで行われていたことから今回が初めての現地での参加となった。そのため、発表自体はかなり緊張したが、なんとかやり遂げることができた。そして、最も嬉しかったことは、発表の後、他の様々な研究者から良い反応をいただけたことや自分の結果に関してその場で議論を行うことができたことだ。また、自分が気になっていた研究について参加していた他の先生方や研究者の方々に直接話かけ、その場で質問や議論を行うことができたこと、他国の学生や研究者などと交流や情報交換が行えたことなど、オンサイトでの国際会議の楽しさを存分に味わうことができた。

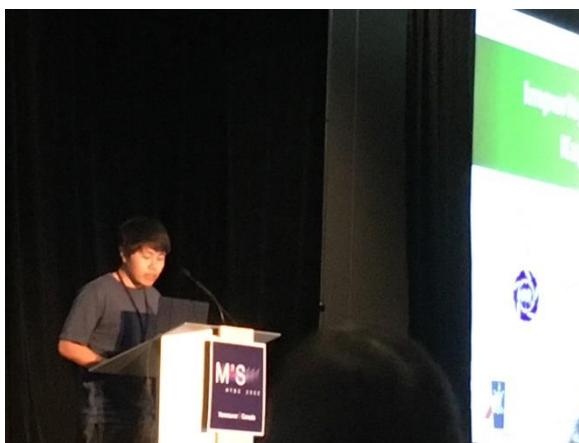


図2 国際会議 M²S における発表 (筆者)

バンクーバーでの生活・研究環境など

筆者自身は今回のような海外長期滞在は初めてであったものの、バンクーバーは様々な国籍の人々が暮らしており、多くの面で非常に暮らしやすい環境であったと感じた。特に UBC は様々な国の料理を扱うレストランやスーパーなどのお店、医療機関などがすべてキャンパス内に揃っており、キャンパス自体が一つの大きな街となっている。公共交通機関はバスや電車が発達しており、バンクーバー中心部までは比較的アクセスしやすい。また、非常に自然が豊かであることや夏ごろは日が沈むのが午後 9~10 時頃と日が長く、非常に快適な気候であるため、スポーツやサイクリング、アウトドアを行っている人々が多く見受けられた。日本との最も大きな違いとしては、バンクーバーのほとんどの人々は夕方 5 時ごろには仕事を終えて各々自由に好きなことをして過ごしており、日本に比べて皆、余裕があるように感じた。ただし、(円安も相まって)物価が非常に高いことは唯一のデメリットであったと言える。

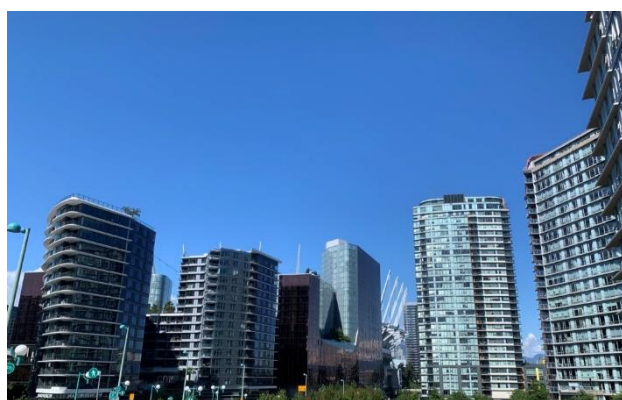


図3 バンクーバー都市部(downtown)の街並み

また、研究環境に関してもその雰囲気は日本と大きく違っていた。今回、TRIUMF 以外にも UBC 内の研究施設である Stewart Blusson Quantum Matter Institute (SBQMI) を見

学させていただいたが、最も大きな違いは研究室間での隔たりがほとんどないということだった。実際に SBQMI では所属研究室が異なる様々な人たちが一つの実験室を出入りしており、他分野の人々と交流しやすい環境にあると感じた。また、日本では基本的に一人の学生に指導教員一人がつき、研究を進めるというスタイルがほとんどであるが、UBC はじめ海外では複数人プロフェッショナルの指導のもと共同研究のような形で研究を進めていくことが多いという話も伺った。また、横のつながりだけでなく、(当然、立場の違いはあるが)上下関係という概念がほとんど存在しないようで、縦のつながりも形成しやすいことやよりフラットな議論が行えるなどは非常に魅力的であると感じた。このような枠組みにとらわれない考え方は日本では難しいのかもしれないが、今後どこで研究するにしても非常に重要なことであり、今回経験したことを大事にしていきたいと感じた。また、資金面での違いも如実であった。SBQMI や TRIUMF では高価な実験装置などがたくさんあり、普段の我々の環境との差を大きく感じた。SBQMI に限らず、実際に中国やカナダの研究者に話を聞くと、個人に与えられる資金は日本に比べて非常に多く、今後、日本で研究していくのであれば限られた予算でどのような研究を行うかを考える必要があることを実感した。

このように UBC での滞在期間や国際会議中に様々な国の研究者に話を聞くことができ、今後の進路を考える上で非常に参考になった。

謝辞

今回の長期海外派遣に際し、多くの方々にご助力を頂きました。

まず初めに今回の派遣を提案していただいた指導教員の芝内孝禎教授に感謝を申し上げます。また、今回の長期海外派遣は MERIT-WINGS の副指導教員である中村泰信教授に推薦していただきました。ありがとうございました。

今回の派遣はコロンビア大学の植村泰朋教授から大きなサポートを受けています。特に植村先生には TRIUMF のチームタイムや実験のアレンジ、結果に関する議論や資金面でのサポートなど、多大なご助力を頂きました。加えて、TRIUMF の実験及び UBC での生活では UBC の小嶋健児教授、Yipeng Cai 氏、Guoqiang, Q. Zhao 氏の三名に特に多大なご助力を頂きました。特に小嶋先生や Yipeng 氏には困ったときに助けていただいただけでなく、観光や食事に連れて行ってもらったことも多く、大変お世話になりました。また、Guoqiang 氏には実験の進め方から解析まで懇切丁寧に教えていただきました。さらに、TRIUMF 滞在校期间中には Marta-Villa de Toro Sanchez 氏、Cyrus Young 氏、Mohamed Oudah 氏、Eric Seewald 氏、Dhruv Kush 氏、Issam Khayr 氏と多くの方々と交流していただき非常に有意義な時間を過ごすことができましたと感じています。特に、Mohamed 氏には SBQMI を案内していただき非常に有意義な機会を提供していただきました。加えまして TRIUMF staff の皆様には大変お世話になりました。特に、Bassam Hitti 氏には M15 での実験で高温までの測定の際に温度調整のセットアップを手伝っていただ

きました。

また、今回の実験は私だけでなく、同じ研究室の後輩である小河弘樹氏、Supeng Liu 氏も参加しており、多くのご助力を頂きました。また、FeSeTe のハイドロップ試料は弘前大学の渡辺孝夫教授、東京都立大学の水口佳一教授、山下愛智助教に提供していただきました。今回、結晶の準備に関して非常に急ぎになってしまい、多大なご迷惑をおかけしてしまいましたが、何とか用意していただき感謝の念が絶えません。また、国際会議で議論や交流をしてくださった皆様にも感謝を申し上げたいと思います。

今回の派遣は自分にとって非常に有意義な経験となりました。関わっていただいた全ての皆様に感謝を申し上げたいと思います。ありがとうございました。