

Quantum Beam & Metal Physics Lab.

東北大学

理学研究科物理学専攻
スピン構造物性グループ

金属材料研究所
量子ビーム金属物理学研究部門

Research



東北大学

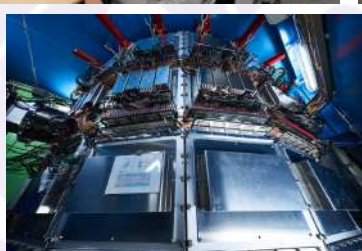
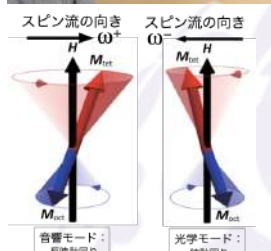


研究室の紹介

スピンの動きを実験的に調べ、物性発現との関係を論理的に考える基礎研究を行っています。



← 座談会「博士進学とその先」と若手研究会を主催した学生と若手研究者



偏極中性子ビームで明らかになった $Y_3Fe_5O_{12}$ のマグノン極性
高エネルギーのスピンの偏極中性子利用を目指すJ-PARCの中性子分光器



学部1年生向けに行った超伝導に関する実験とセミナー



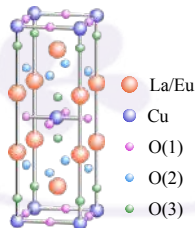
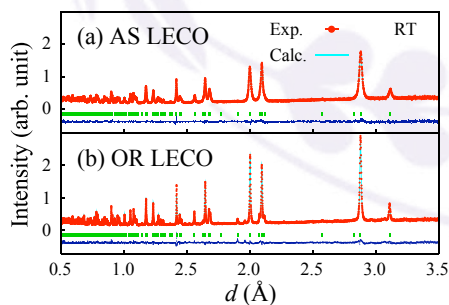
自主ゼミ (上) と忘年会 (下)

研究内容

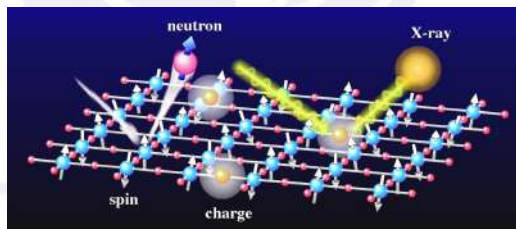
スピン構造物性グループには、スピンが絡む量子現象に興味を持つ者が集まっています。高温超伝導体のスピン・電荷ダイナミクスを中心に、重い電子系化合物、スピントロニクス基盤物質、金属磁性体など、数多くのスピン関連質を対象に研究を展開しています。着目点は、量子現象の発現メカニズムを、スピンの特異な“構造”と“動き”を観ることにより解明することです。そのために、研究に適した高品質単結晶を自作し、中性子ビームや放射光X線、ミュオンビームを融合利用した手法で研究を進めています。研究は、教員や先輩学生と行いますが、多くの学生が主体的に進めています。本研究室は、中性子散乱に関する国内最大級の専門研究室です。日本が世界に誇る大強度陽子加速器研究施設J-PARCと研究用原子炉JRR-3に複数の中性子散乱装置を管理し、研究に活用しています。世界的に見ても、このような研究環境を有する研究室はほとんどありません。

現在、我々が精力的に行っているテーマは以下の通りです。

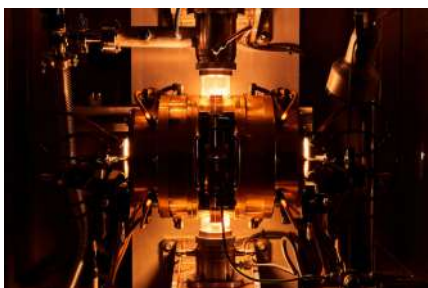
- (1) 高温超伝導体のスピン、電荷、格子の複合揺らぎ
- (2) 重い電子化合物の量子臨界現象
- (3) スピントロニクス技術の基盤となるガーネット型磁性体の動的磁性
- (4) 新規高エネルギー中性子偏極スピンフィルターの開発とビームラインへの実装



スピン・電荷のダイナミクス観測のイメージ図。



超伝導体 $La_{1.8}Eu_{0.2}CuO_4$ の粉末回折パターン (左) と結晶構造 (中)。構造の同定は物性解明への第一歩です。



結晶育成の様子。結晶の品質が研究を左右します。

研究対象の単結晶作成

測定を行うためには良質の試料が欠かせません。私たちの研究室では、単結晶作成を独自に行う環境を整えています。どこにも存在しない結晶を作ること、科学の発展につながる新発見の原動力となります。従来育成が困難とされていた物質や、研究の付加価値の高い物質の結晶化を、独自のアイデアで行う事は楽しいです。これにより世界で初めて行われる実験を先導しています。また、実験結果を次に必要な試料の作成にフィードバックできるため、柔軟で自由度の高い研究が可能です。

中性子粉末回折装置 (HERMES)



三軸型中性子分光器 (AKANE)



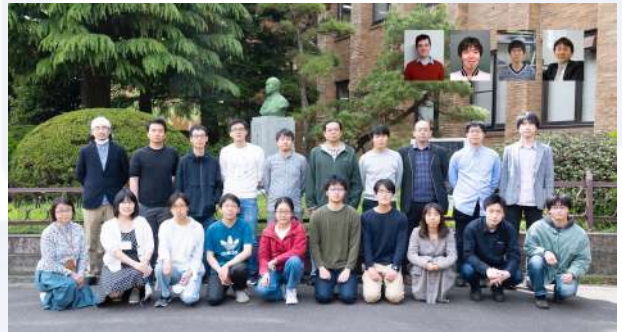
量子ビームの活用

私たちの研究室では、構造とダイナミクスの研究ツールとして中性子散乱法を活用しています。中性子散乱は広い空間・時間スケールでの測定が可能で、物質内に存在するスピンの情報を得る上で威力を発揮します。また、電子の複数自由度が絡み合った新規な相互作用の決定と物性発現の原因の解明には、それぞれの自由度を調べるのに適した、特性の異なる人工放射線（量子ビーム）を相補利用した研究が重要との立場から、マルチプローブ実験を行っています。中性子実験を基軸にミュオンや放射光X線などの量子ビームを幅広く利用することが本研究室の特徴のひとつで、研究対象を多角的に捉えて本質に迫っていきます。これら量子ビーム実験には国内外の多数の大型施設を利用しており、国内ではJ-PARC, JRR-3（東海村）やSPring-8（佐用町）、PF（つくば市）などの先端実験施設で行っています。

左図：研究室スタッフが管理する中性子散乱装置。この他に2台の装置があります。これらを利用して原子とスピンの“構造”と“動き”を観測します。

研究室からのメッセージ

物理が好きな学生、新しいことをやってみたいという学生を歓迎します。本研究室では、中性子、X線、ミュオンと言った量子ビームを使った物性研究を国内外で推進しており、学外の研究グループとの交流も盛んです。また、研究会や国際会議への参加、国内外の他研究室への留学を通して、学生も世界中の研究者と最先端研究の議論を行っています。一方で、じっくりと腰を落ち着けて、結晶作成や自作した試料の評価も研究室内で行います。作成した高品質の結晶は自分たちの研究に使うだけでなく、共同研究グループにも提供します。自分の研究をどのようなスタイルで進めるかは、教員スタッフと相談しながら決めていきますが、いずれの場合にも共通することは、基礎を大事にして論理的に物事を考える力を身につけ、物理や研究を楽しむということです。このような研究内容と活動に興味を持っていただいた方は、気軽にご連絡下さい。学生の生活は研究室のホームページでご覧頂けます。



量子ビーム実験を行う世界の施設



お問い合わせ

スピン構造物性グループ
量子ビーム金属物理学研究部門
藤田 全基 教授

〒980-8577
宮城県仙台市青葉区片平2-1-1
金属材料研究所・4号館1階111号室
TEL: 022(215)2035, 2037
FAX: 022(215)2036
E-mail: fujita@tohoku.ac.jp
URL: <http://qblab.imr.tohoku.ac.jp/>

量子ビーム実験に興味を持ったきっかけとこれまでの取り組み

梅本 好日古 (博士後期課程学生 D3)
yoshihiko.umemoto.t6@dc.tohoku.ac.jp



学位論文のテーマとして、修士課程のころから「鉄マンガン基合金における恒弾性特性の起源解明」の研究に取り組んでいます。恒弾性とは、温度に対して物体の硬さの指標の一つであるヤング率が変化しないという特性です。鉄マンガン合金の結晶構造やマルテンサイト変態に対して、モリブデン置換がどのような影響を与えるのかということに注目し、弾性率異常がなぜ起きるのかを明らかにすることを目標に活動しています。修士課程の時に、恒弾性が得られる組成では、 Γ_3 モードのフォノンにソフト化と非線形異常があること、および、FCCとHCPの2相混合状態を取ることを明らかにしました。このことを手掛かりに博士課程では、フォノンの異常がどのような空間スケールや構造により生じるのかという観点から、複数の施設・ビームラインを利用して研究を進めています。右にJRR-3を利用して中性子回折実験を行ったFeMnMo合金の多結晶試料を示します。



中性子回折実験のためにアーク溶解により作製したFeMnMo多結晶合金。

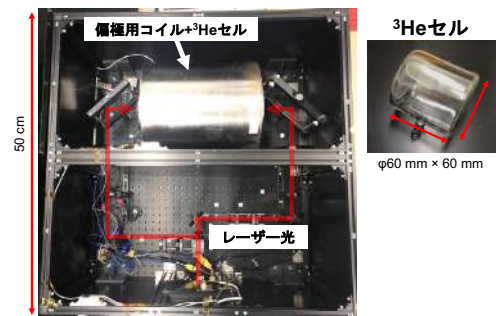
私が量子ビーム実験に興味を持つきっかけになったのは、学部3年生の時に、第10回KEKサマーチャレンジ物性コースで μ SR法の基礎を学ぶ演習を体験したことです。その後、大学院では試料合成から量子ビーム実験・解析の一連の流れすべてに参加して研究を進めることができる、現在の研究室に進学しました。進学してからは、修士1年生の時に第3回中性子・ミュオンスクール(μ SR演習班)に参加しました。学部生の時よりも専門度の高い講義を受け、hands-on実験ではMnSiの常磁性相へリカル磁性相の磁気相転移を観測することができました。博士2年生の1年間は総合研究開発機構(CROSS)研究生として、中性子小角散乱のビームライン大観(J-PARC MLF)にて活動しました。自分が実験責任者として企画した実験の実施のほか、飛行時間法によりMnSiにおける磁気準弾性散乱信号の観測を狙うCROSS開発課題や、長周期の磁気構造が期待される物質の磁気ブラッグピークの観測を偏極解析により狙う実験に参加しました。これらの活動は毎回主催者や企画の主目的が異なっており、それぞれ独立したものです。しかし、振り返ってみた時に、私の中にはひとまとまりのつながりがあります。このように意欲があれば1つの軸に沿って多彩な体験ができるということは貴重なことだと考えています。量子ビーム関係のコミュニティからは長期にわたり継続的に学ぶ機会を頂き、感謝しています。

偏極 ^3He ガスを用いた次世代中性子スピン偏極デバイスの開発

高田 秀佐 (特任助教)
shusuke.takada.d7@tohoku.ac.jp



スピン偏極した中性子ビームは、水素化物などのエネルギー材料研究、スピンを対象とする物性研究、素粒子・原子核物理研究など、幅広い分野で利用されています。偏極中性子ビームを得るための新しい手段として、 ^3He ガスを利用するスピフィルター(右図)が最近注目されています。 ^3He スピフィルターは、ミラー偏極子では偏極できない20 meV以上のエネルギーの中性子に対しても適用できます。また、スピン交換光ポンピング(SEOP)法により ^3He 核を偏極するため、従来の核偏極で必要とされる高磁場や極低温を必要としないという利点があり、コンパクトな実験系を組むことができます。一方で、 ^3He 核の偏極は外磁場の影響を受けて減偏極しやすいため、超電導磁石を用いて試料に高磁場を印加する実験や、中性子遮蔽体として磁性体(鉄など)が豊富に使用されている中性子ビームライン環境には導入しづらいという欠点を持ちます。そこで、 ^3He スピフィルターの実用化のために、超電導磁石との共存や中性子ビームラインへの導入を目的とした研究を行っています。本研究によって、茨城県東海村の大強度陽子加速器施設(J-PARC)および研究用原子炉JRR-3の世界最先端の中性子ビーム実験施設において、 ^3He スピフィルターによる高エネルギー偏極中性子の常時利用が可能な環境の構築を目指しています。



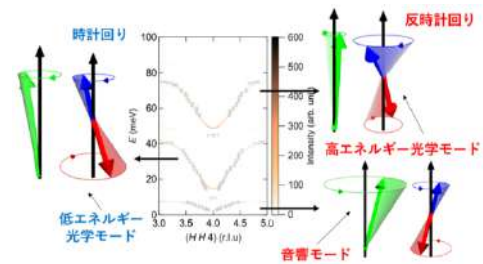
^3He スピフィルターは、 ^3He が充填されたガラスセルや偏極コイル、レーザーなどで構成されます。

希土類ガーネット物質系の 4f 電子磁性が寄与する動的物性とスピンカロリトロニクス

川本 陽 (博士後期課程学生 D3)
You.kawamoto.t8@dc.tohoku.ac.jp



スピントロニクス分野では、磁気・電気・熱の相互変換現象やそのデバイス開発が精力的に為されている。中でもスピン角運動量の流れであるスピン流は、電流を伴わない高効率なエネルギーや情報の輸送手段として当分野では注目されている。希土類ガーネット物質 $RE_3TM_5O_{12}$ ($RE = Gd, Dy, Tb, TM = Fe, Ga$) は 1900 年代に大きく注目されていた物質系だが、当分野では再び関心が集まってきた。特に $Y_3Fe_5O_{12}$ (YIG) は、当分野で最も有名なフェリ磁性絶縁体である[1]。特に磁気・熱変換現象を中心に扱うスピンカロリトロニクスでは、熱とスピン流の変換現象であるスピンゼーベック効果 (SSE)、及びそれを金属薄膜によって電氣的に検出した SSE 信号や、磁場中で熱流が曲がる熱ホール効果など、実用化の観点からスピン・熱流の巨視的な物性測定に基づいた研究が主流である[1, 2]。しかし巨視的物性の測定は物質内を伝播するスピン波(マグノン)や格子振動(フォノン)の寄与の総和を検出している。そのため、物質固有のスピン流・熱流輸送特性の仕組みを本質的に理解するためには、フォノンやマグノンの振動特性をより詳細に調査する必要がある。そのため中性子や X 線など、物質の振動特性を波数・エネルギー空間上に分解することができる量子ビームは、本分野でも重要な役割を担うようになってきた。例えば最近では、スピン偏極した中性子を利用し、YIG のスピン波における磁化の歳差運動の回転方向を観測した事が報告されている。この結果は、YIG のスピン流輸送特性の理解に大きく貢献した[3]。しかしこの研究は当分野における量子ビームの有用性を示すほんの一例であり、本物質系はこれまでフォノンやマグノン等の動的物性は殆ど観測例が無かった。私の研究では、4f 電子磁性をもつ希土類ガーネット物質におけるスピン流・熱流輸送特性に着目し、量子ビームのメリットを活用してその機構解明を目指している(図)。



- [1] K Uchida *et al.*, *Journal of Appl. Phys.* **111**, 103903 (2012).
- [2] C. Strohm *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 155901 (2005).
- [3] Y Nambu *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **125**, 027201 (2020).

図 本研究の代表的な成果の図。テルビウム鉄ガーネットのスピン波分散を中性子で測定し、データ解析によって各モードの運動の様子を理解する事が出来た。

手法によって性質が変わって見える電子。本性は何だろう？

谷口 貴紀 (助教)
takanori.taniguchi.d3@tohoku.ac.jp



物質の性質を決める主たる原因は電子である。例えば、ナトリウムと塩素はそのまま接種すると人体に対して毒物となるが、両者が合成された塩化ナトリウムは人体には欠かせない性質である。この大きな性質の違いも電子によって説明される。電子を制御できれば、有用な性質を引き出すことができる。そのためには、その電子の本性を理解して性質が現れる理由を解明し、その性質が生じる条件を持った物質の合成が必須である。

この一連を実現するには、時間スケールが異なる手法を組み合わせる対象を観測するのがいい。例えば、電子の回転運動、すなわち磁性について考えてみよう。時間スケールが遅い手法ではスピンは並んで見える磁石が開発されたとする。課題は、この磁石の磁性の強さを制御することである。早い時間スケールの手法で観測したところ、スピンはバラバラであった。遅い時間スケールの手法では揃っていたので、本性はある揃った軸に対して回転運動をしていることが予想できる。そのため、軸とスピンの角度を変えるように物質の合成を行えば、磁石の磁性の強さを制御できる。物質を複数の実験手法を用いて観察することでその本性が分かる一例である。本性が分かると、この性質となった原因を考え、さらに欲しい性質を持つ物質開発にフィードバックできる。私たちの研究室は合成及び複数の量子ビーム実験を組み合わせる研究を進めることができるので、この一連を行うことができる環境が整っている。

最後に、最近合成に成功した単結晶試料の写真を紹介する。この物質は狙い通りの性質を示してくれるのか？それとも予想外の結果なのか？物質科学は楽しくて仕方がない。

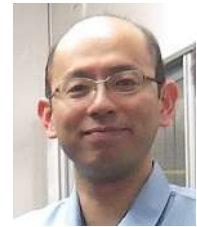


最近合成した単結晶試料

物質を探る素粒子の目

岡部 博孝（特別助教）

hirotaka.okabe.b4@tohoku.ac.jp



近年、構造物性学の分野では「不均一性」という言葉が重要視されています。結晶は「均一」、液体は「不均一」ですが、その中間ではガラス（アモルファス）というどちらも異なる性質が現れます。この性質を利用したものが、太陽電池や薄膜トランジスタで有名なアモルファスシリコンなどです。実はこのようなガラス的性質は電子系、すなわちスピン構造物性にも現れます。スピンとスピンの間に働く相互作用が複雑になると、各スピンはどちらを向いたら良いか分からなくなり、フラストレーションを感じます。こうしたフラストレーションがスピンの間に纏わるガラスや液体のような新奇物性を生み出す源になります。

ガラスのような複雑な物性を理解するには、マクロとミクロ、平均構造と微視的構造を注意深く観察する必要があります。この微視的構造を見るために利用するのが、素粒子の一種「ミュオン」です。

物質にミュオンを撃ち込むと、重い電子または軽い陽子のように振舞い、化学的に安定な位置に停止します。ミュオン自身もスピンを持っているため、周囲にある原子や電子のスピンと相互作用し、それらがどのような大きさでどちらを向いているのかを素粒子の視点から教えてくれます。ミュオンから得られた微視的構造と中性子から得られた平均構造を比較することで、不均一性の本質を理解しようという試みです。

ミュオンは自然界にもありますが、実験に使える程の密度ではありません。そこで私たちは高エネルギー加速器によって人工的に作られたミュオンを使っています。日本では茨城県東海村にあるJ-PARC（右図）という大型施設でミュオン実験を行うことができます。興味を持たれた方は、ぜひ一度見学にいらして下さい。



J-PARC ミュオン実験エリアでの一幕（物構研 News より転載）

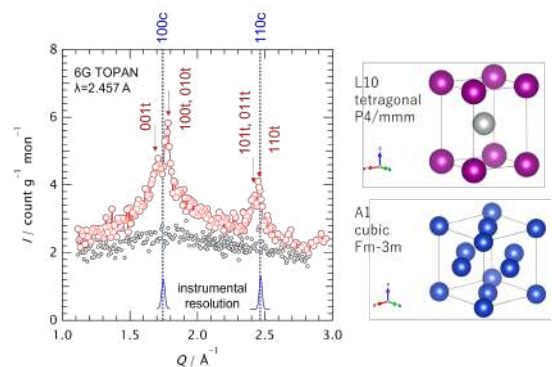
量子ビームを用いて金属の研究をしています

池田 陽一（助教）

yoichi.ikedai.d2@tohoku.ac.jp



池田陽一と申します。生まれは滋賀の湖北地方ですが、その後、富山、札幌、岡山、千葉の柏と点々とし、現在は東北大学金属材料研究所で研究をさせて頂いております。仙台に来るまでは、主に希土類金属間化合物における電子相関を調べておりました。粗略な表現ではありますが、金属中には比較的自由に動くことのできる電子と、原子の近くに束縛された電子を考えることが出来、前者は伝導特性を担い、後者は磁性を担うと言えます。私は、そのような「自由な電子」と「束縛された電子」が相互作用することで起こる現象（例えば、重い電子状態）に興味を持っております。実験による研究手法を基盤として、特に、試料合成、5万気圧程度までの圧力下実験、中性子回折・散乱実験等を得意として、それらを組み合わせた実験手法の開発も進めております。仙台に来てからは、これまでの研究に加えて、異なる分野との連携研究も進めており、現在はハイエントロピー合金の研究プロジェクトに参加させて頂いております。ハイエントロピー合金は、これまでの金属材料にはない高い強度を有する合金として注目を集めておりますが、その特異な材料特性の起源は十分には解明されていません。取り分け当該合金中で発達する短距離秩序に興味を持ち、これまでに行った中性子実験によって、合金中で発達する規則相の空間相関の大きさ等を評価することに成功しました。中性子を利用した研究等、小職の研究にご興味のある方は、お気軽に、ご相談頂ければと思います。



合金中の短距離秩序は散漫散乱として観測されます。その一例を上図に示しました。散漫散乱の現れる波数や、その広がりから短距離秩序の特徴を明らかに出来ます。