

10³T NEWS LETTER

文部科学省 科学研究費助成事業 学術変革領域研究(A) 令和5年度～9年度

1000テスラ超強磁場による化学的カタストロフィー：非摂動磁場による化学結合の科学

1000-Tesla Chemical Catastrophe : Science of Chemical Bonding under Non-perturbative Magnetic Fields



X線自由電子レーザー施設SACLAにおけるPINK-02を使用した110テスラ発生と、
それに伴う一巻きコイルの爆発の様子

cover 10³T



文部科学省 科学研究費助成事業 学術変革領域研究(A)
1000テスラ超強磁場による
化学的カタストロフィー
非摂動磁場による化学結合の科学

学術変革領域研究(A)
1000テスラ科学班ニュースレター 第2号
2025年2月発行

編集人 池田 暁彦 (電気通信大学)
発行人 松田 康弘 (東京大学 物性研究所)
1000テスラ科学領域事務局
東京大学 物性研究所 (柏キャンパス)
〒277-8581 千葉県柏市柏の葉5丁目1番5号
E-mail : kaori.oshima@issp.u-tokyo.ac.jp



<https://1000tesla.issp.u-tokyo.ac.jp/>

No. 02

10³T NEWS LETTER

No. 02 contents

領域代表挨拶	.....	3
公募班紹介	.....	4
成果報告	.....	16
研究者紹介	.....	19
若手海外派遣報告	.....	20
活動報告(ワークショップ)	.....	22
活動報告(班会議報告)	.....	27

1000テスラ科学： 自然科学のフロンティア開拓

領域代表挨拶

手探りのまま走り出した本領域も2年目のスタート地点に到達しました。公募研究課題として新たに23の研究者の皆さまにご参画頂け、研究展開の加速が大変楽しみです。

磁場は多彩な量子効果を生み、自然科学において重要な役割を果たしますが、一方で、基底状態を大きく変化させるような非摂動的な強磁場効果については、実験・理論の両面において十分理解されていません。その解明のために本学術変革領域があると考えています。

コイル破壊限界領域の磁場100 Tにおける自由電子のスピンゼーマン分裂エネルギーは、約135 Kでの熱エネルギーに相当します。多くの日常的に触れる固体が室温で安定であることを考えますと、非摂動的磁場効果を起こすには、少なくとも室温程度かそれ以上のエネルギーが必要と考えられます。1000 T (⇔1350 K)級の磁場発生には、エネルギーを空間的・時間的に圧縮する技術が必要であり、さらには磁場発生直後に爆発的破壊を伴います。この技術的ハードルは、自然界がそう安々と基底状態の変化を許さないことの帰結だと考えています。本領域は、固体から高分子、分子、プラズマ、素粒子と研究対象が広範囲にわたりますが、磁場効果が荷電粒子へのローレンツ力に起源を持つ普遍的な現象であることから、対象を問わず多彩な現象が現れると期待しています。

この1年間、可搬型パルス磁場装置の整備に大きな進展があり、2年目にはその利用による研究の進展が期待できます。非摂動磁場効果の探索には、その芽を見つけるため、裾野の強磁場研究を拡大することも必要です。また、いくつかの研究対象においては、新しい磁場誘起相転移の兆候が見つかっています。カタストロフィー(変革)を起こし、非摂動磁場のフロンティアを開拓できる喜びを皆さまと共有し、楽しんでいきたいと思えます。

領域代表

東京大学 物性研究所
松田康弘

松田康弘



電荷・スピン・格子複合系の非平衡シミュレーション



諏訪 秀磨
 東京大学大学院理学系研究科
 助教
 新しい計算手法を開発しつつ実験の提案につながるシミュレーションを行います！

電荷・スピン・格子自由度が絡み合う系のダイナミクスでは、各自由度がそれぞれ典型的なエネルギースケールに対応した時間スケールを持ち、緩和時間の分離が起きます。そこにパルス磁場のような短い時間スケールの外場をかけると、緩和時間の短い自由度のみが外場に応答し、熱平衡状態では現れない新奇な非平衡状態や準安定状態が生じると期待されます(図)。

本研究では、スピン格子結合が本質的となるフラストレート磁性体や、電荷スピン結合が顕著となる「弱い」モット絶縁体に焦点を当て、巨大なパルス磁場印加で生じる新しい磁性相と非平衡現象を解明します。

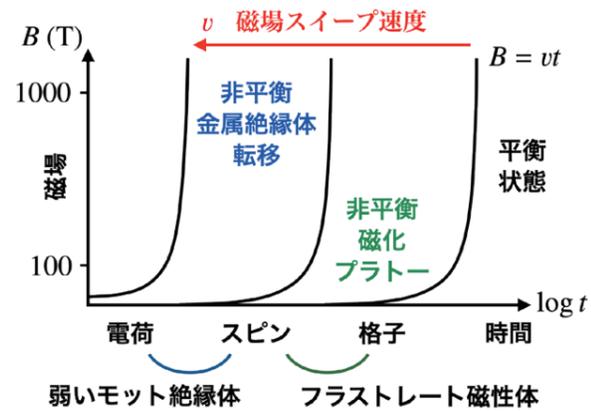


図 急激な磁場変化で生じる非平衡現象の概念図。

擬一次元半金属における磁気熱電機能と新奇量子相の探索

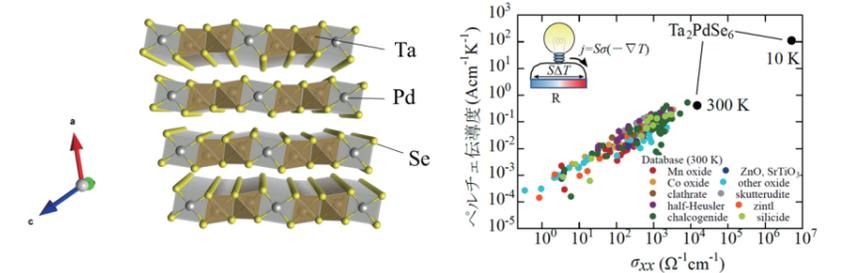


中埜 彰俊
 名古屋大学理学研究科
 助教
 強磁場で機能性半金属に新たな展開を！

半金属は価電子帯と伝導帯がわずかに重なった電子構造を持っており、絶対零度においても電子と正孔が共存する。その電子構造はキャリアが高い移動度を獲得するのに有利であり、電子-正孔共鳴による巨大磁気抵抗等の興味深い磁気機能性の舞台となっている。さらに、ある種の半金属の量子極限においては電子-正孔間の相互作用による電荷密度波相が出現する可能性が指摘されている。この電子相は半世紀以上に前に理論予測されたものの、未だにその存在が実証された例がほとんどない。

本研究では、擬一次元半金属 Ta₂PdSe₆を舞台とし、磁場を制御パラメータとした半金属の新機能・新電子相開拓を推進する。本系で興味深い

のは高い移動度の伝導キャリアが、①高い熱電機能性を示すこと、②ヴィーデマン・フランツ則を深刻に破った非フェルミ液体状態にあることである。これらを足掛かりに、本研究では高い磁気熱電機能、および磁場下における電荷密度波相の観測を目指す。

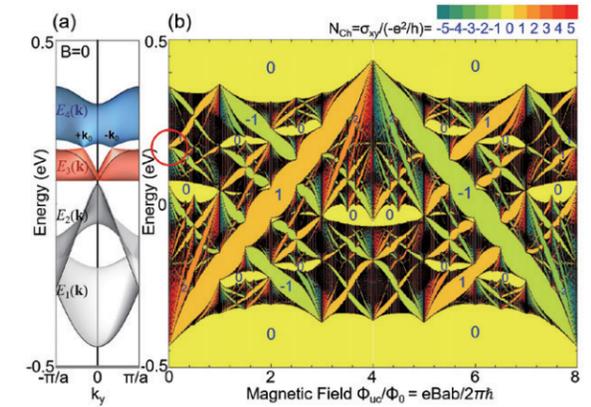


超強磁場下低次元 Bloch 電子系の大域的電子状態



長田 俊人
 東京大学物性研究所
 教授
 まとめの実験？

本研究では、超強磁場における結晶の大域的電子構造を反映した伝導現象の提案と実験的確認を目指します。具体的には、①超強磁場量子極限における Harper broadening 由来の負磁気抵抗と3次元 Hofstadter 構造、②超強磁場下 Zeeman 効果による狭バンド系の深部スペクトロスコピー、③層状物質における超強磁場下 Fermi 面間共鳴トンネル伝導、といった課題について理論的検討を行うと共に、低次元結晶や原子層物質についてのパルス超強磁場下高周波実験を領域内共同研究として試みたいと思います。



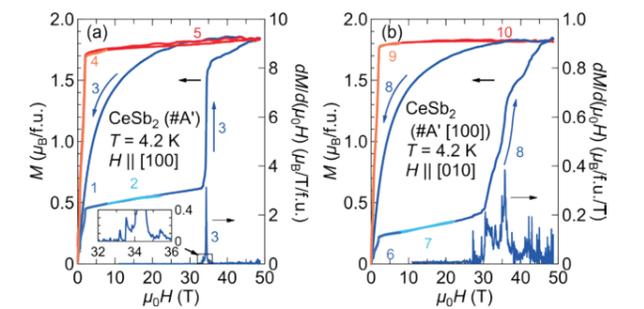
磁場誘起相のクエンチ / 磁場誘起結晶軸変換現象



三宅 厚志
 東北大学金属材料研究所
 准教授
 多様な専門家との交流が大変楽しみです。

本課題はパルス磁場の速い磁場掃引と試料温度の精密な制御によって、磁場誘起相をゼロ磁場までクエンチする方法を確立し、その磁場誘起相の特性をゼロ磁場相への物性に付与できないか、という提案であった。その課題申請後に磁場によって結晶軸が変換する、という大変珍しい現象を発見した。図(a)に示すように、CeSb₂に[100]方向に磁場を印加すると、34T付近で突然磁化が増大し、大きな磁場履歴を示す。その後の実験では磁化の値が増大するメモリー効果を観測した。室温で試料の向きを変えて、[010]方向に磁場を印加すると、[100]と同様の振る舞いを示すことが分かった。さらに、結晶軸そのものが磁場で変換することを指示する結果も得られつつある。この軸変換現象は、従来の「重い電子系の物理」に収まらない概念を秘めていると期待している。本課題では本来の

提案内容であるUTe₂のメタ磁性相のクエンチによる超伝導特性の変化、新たに発見したCeSb₂における磁場誘起軸変換現象の解明に取り組む。



強磁場下における 強相関トポロジカル相の探索



山田 林介
東京大学大学院工学系研究科
助教

パルス強磁場で誰も見たことがない新現象を発見しましょう！

地上における磁場の効果は一般的に弱く、摂動的な寄与をもたらすにとどまる。しかし、すべての電子が最低ランダウ準位に縮退する量子極限と呼ばれる強磁場領域では、バンド電子に対するカタストロフィーが生じる。特に、次元性の変化は最も顕著な現象の一つである。低磁場で三次元的な輸送特性を示す伝導電子は、量子極限において磁場に垂直な面で磁気長 (l_B) 程度に量子閉じ込めを受ける。その一方で、磁場方向には平均自由行程 (l_{free}) を持つため、結果として擬一次元状態が実現する。一次元系では、非フェルミ液体の代表例である朝永ラッティンジャー液体やパイエルズ不安定性に由来した電荷・スピン密度波など、電子間の相互作用に起因した特徴的な量子相が発現する。本研究では、パルス強磁場を用いて強相関ディラック電子を擬一次元状態に閉じ込めることで、新奇トポロジカル電子相の開拓を試みる。量子極限で巨大磁気抵抗を示す強相関ディラック半金属 $CaIrO_3$ を対象として、パルス強磁場中で非線形伝導

測定を行う。電荷密度波由来の非線形伝導特性や朝永ラッティンジャー液体に特徴的なべき乗則に従う I-V 特性の観測を目指す。

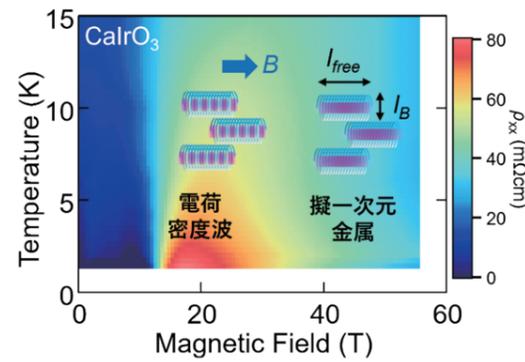


図 パルス強磁場下における $CaIrO_3$ の電子相。

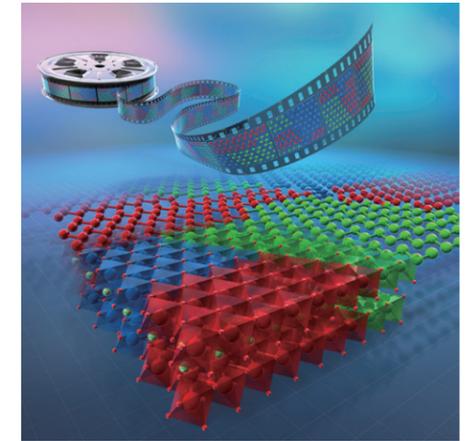
非摂動磁場による量体化 分子系の短距離秩序の切断



片山 尚幸
名古屋大学工学研究科
准教授

強磁場を利用して形成と破壊をくりかえす動的な分子結合の特徴を明らかにします！

無機固体の構成元素である遷移金属が自発的に集まって分子を形成する現象に興味があり、構造解析の立場から研究を進めてきました。低温で分子が規則正しく並んだ状態には複雑な構造のものが多いので、構造解析者としての腕の見せ所ですが、我々が興味を持っているのは分子が現れる直前の高温相の構造です。高温相は一見すると非常に対称性の高い規則格子に見えますが、PDF (pair distribution function) 解析などの局所構造解析手法で結晶構造を眺めてみると、複数の系で長距離秩序を持たずにランダムに分子が現れる様子が観察されます。これらの分子は、分子の配向が短い時間スケールで変化する柔軟性結晶のようなダイナミクスを持つことが分かりました。本公募研究では、パルス強磁場によってこれらの動的な分子の結合を切断し、放射光 X 線でその様子を捉えることを目指します。



希土類磁性ダイマー物質における 非摂動磁場カタストロフィー

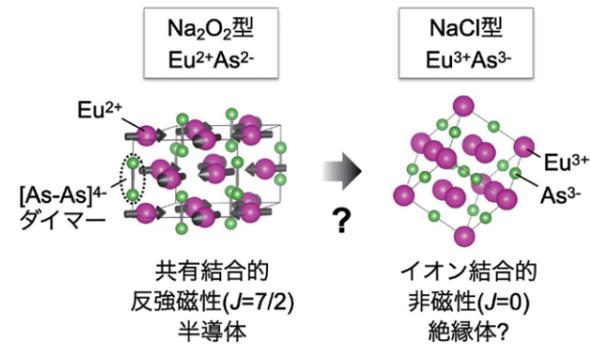


打田 正輝
東京工業大学大学院
准教授

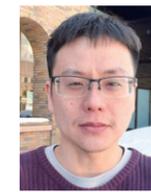
これからどうぞよろしくお願致します。

100T を超える超強磁場による強いエネルギー変化を利用した研究としては、ダイマー物質 VO_2 においてシングレットの結合状態を破壊し絶縁体から金属への転移を誘起した例や、希土類磁性化合物 $EuNi_2(Si_{1-x}Ge_x)_2$ においてゼーマン効果により価数転移を誘起した例等が知られている。本研究提案では、これらの両方の特徴を持つと考えられる $EuAs$ に着目する。本物質は Eu が歪んだ三角格子をなすが、 As がダイマーを組む物質としても興味深い。図に示すように、 Na_2O_2 型の $Eu^{2+}As_2^{2-}$ は共有結合的・反強磁性 ($J=7/2$)・半導体、 $NaCl$ 型の $Eu^{3+}As_3^{-}$ はイオン結合的・非磁性 ($J=0$)・絶縁体、といった特徴をそれぞれ持つと考えられ、100T を超える非摂動的磁場によってシングレットを破壊できれば、結合状態・結晶構造・電子構造・スピン状態

等の自由度が複合的に絡んだカタストロフィック現象の発現が期待される。



NMR 測定を破壊型パルス 磁場中でも実現



井原 慶彦
北海道大学理学研究院
講師

NMR の最高磁場レコードを更新します！

物質のミクロな磁気状態を調べるうえで、NMR 分光法はとて有価な測定手段です。特に、ケミカルシフト (NMR 共鳴線の周波数シフト) は分子の結合状態を強く反映しているため、分子構造の同定に広く用いられています。また、電気四重極能率を持つ原子核に対しては、原子核サイトでの電場勾配との間に電子機銃局相互作用を持つことから、NMR スペクトルの形状には観測対象となる原子核周辺のイオン配置や対称性が反映されます。これらの情報は、超強磁場中で生成される新物質の構造を明らかにするうえで非常に重要ではありますが、磁場発生時間が非常に短い破壊型パルス磁場中では、NMR 測定実現に対する原理的な障壁が立ちあはだかっています。中でも、NMR 信号の元となる核磁化の分極に長い時間がかかることは一番の問題です。本研究では、ゼロ磁場中での核磁化分極を利用する新しい NMR 信

号の観測方法を取り入れることで、破壊型パルス磁場中での NMR 測定実現を目指します。



ポメランチュク電子は磁気相転移の夢を見るか？



今城 周作
東京大学物性研究所
特任助教

目指せ磁場発生職人！

ヘリウム3に固有の性質としてポメランチュク効果という現象があります。ある圧力下では、ヘリウム3の液体を加熱すると固化するという奇妙な現象です。この性質はヘリウム3の核スピンの起因するため、磁場中ではスピン自由度に起因した新しい量子状態や磁気的相転移などが起きるかもしれません。ただ、ヘリウム3は貴重な資源であり、実験的にも困難です。そこでヘリウム3の代理はないのか？と考え、同じフェルミ粒子の電子に目を付けました。

つまり、タイトルの意味は、ヘリウム3に似通った電子(ポメランチュク効果を示す電子)は、磁場中でヘリウム3と同等の磁気応答を示すのか？という問いかけです。

ヘリウム3がポメランチュク効果を示す理由は、固体中でも核スピン間相互作用が極めて小さいためにスピンエントロピーが極低温まで残るためです。液体より固体の方がエントロピーが高いという奇妙な状況であり、このような状況はなかなか起きません。相関金属は電子のフェルミ液体ですが、電子相関がありますので、固化(つまり絶縁化)する時に

はスピン間相互作用のせいでポメランチュク効果は現われません。本課題では、なんとかして固化と同時に相互作用が消失するような状況を作って、ヘリウム3に似せた電子を生み出すことで、ヘリウム3が夢見る磁場中の物理を追うことができないかと考えています。

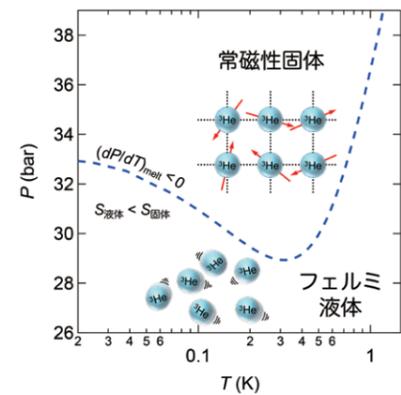


図 ヘリウム3の温度・圧力相図。ある領域で融解曲線の傾きが反転する(ポメランチュク効果)

「非摂動磁場を含んだ相対論的強束縛近似法」によるカタストロフィック現象の研究



樋口 雅彦
信州大学学術研究院理学系
教授

初めての方が多いと思います。宜しくお願いします。

最近われわれは、磁場下固体の電子状態を第一原理的に計算する手法である「非摂動論的磁場を含んだ相対論的強束縛近似法(nonperturbative magnetic-field containing relativistic tight-binding approximation method:以下、非摂動MFRTB法)」を開発した[1-4]。本手法では、磁場の非摂動論的効果を取り込むことが可能である。これまでに、本手法を結晶Si適用し、超強磁場によって結晶Siのエネルギーバンドギャップが消失し、バンド絶縁体から金属へ相転移することを理論的に示してきた(図)[4]。

本公募研究では非摂動MFRTB法を用いて、(1) 超強磁場が印加された固体(Si, VO2, FeSi)において、超強磁場により誘起されるバンド絶縁体から金属への相転移現象(化学的カタストロフィー)に伴う化学結合状態の変化、(2) 超

強磁場によって誘起される金属相における磁気振動発生メカニズム、(3) 化学的カタストロフィーに伴う磁気的ブロッホ状態の幾何学的位相変化、を明らかにします。

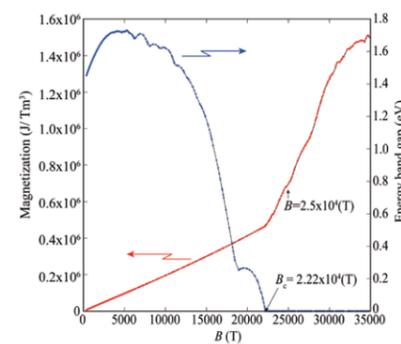


図 非摂動MFRTB法によるシリコンのバンド絶縁体から金属へ相転移(二次相転移)

関連文献

[1] Higuchi et al., *PRB* 91, 075122(2015). [2] Higuchi et al., *PRB* 97, 195135 (2018). [3] Higuchi et al., *JPSJ*, 88, 094707 (2019). [4] Higuchi et al., *NJP* 24 103028 (2022).

結晶性固体極性分子ローターにおける回転の磁場との相互作用



瀬高 渉
東京都立大学都市環境科学研究科
教授

目標達成に向けて努力します

大規模かご型固定子の内部に回転可能な高極性部分構造が架橋された「固体極性分子ローター」(図のC14PhF2) やその関連化合物について、回転運動と強磁場との相互作用を明らかにすることを目的とする。これらの固体極性分子ローターの熱回転運動は、粉末の誘電緩和で観察可能であり、まず、その緩和が磁場摂動を受けるかどうかについて明らかにする。さらに、これらの分子ローターにおいて磁場下で回転運動がローレンツ力を受ける系が見つかれば、回転軸が揃っている結晶構造の特徴

を利用して、回転の偏りにより生じる合成角運動量の力学利用について検討する。

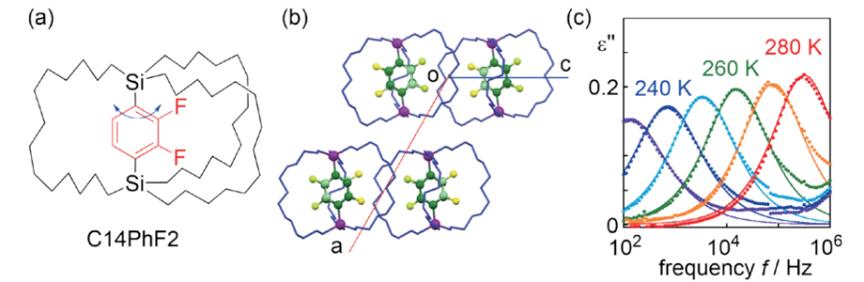


図 (a) 固体分子ローターC14PhF2の構造式; (b) 結晶構造; および (c) 粉末の誘電緩和スペクトル[2].

関連文献

1. "Structure and Dynamics of Crystalline Molecular Gyrotops with a Difluorophenylene Rotor", W. Setaka, K. Yamaguchi, Proc. Natl. Acad. Sci. 109, 9271 (2012).
2. "Thermal modulation of birefringence observed in a crystalline molecular gyrotop", T. Tsuchiya, Y. Inagaki, K. Yamaguchi, W. Setaka, J. Org. Chem. 86, 2423 (2021).

非摂動磁場を用いた電荷移動制御と物性探索



福岡 脩平
北海道大学理学研究院
助教

ここでしか出来ない超強磁場研究に挑戦できることを楽しみにしています。

有機導体TTFCAとその類縁体を研究対象として、非摂動磁場による固体中での電荷移動の制御的誘起を実現し、電荷移動に伴い結晶の結合様式、電子状態が変化する過程で現れる新物質相、新現象の探索と解明に取り組みます。TTFCAは結晶内で電荷移動が生じる中性イオン性(N-I)転移を示す物質であり、図に示すように非磁性中性相(N相)、イオン性強誘電相(I_{ferro}相)、イオン性常誘電相(I_{para}相)の3相が存在します。化学結合の立場から見ると、N相からI_{para}相への変化はTTFCAが電荷移動によりファンデルワールス結晶からイオン結晶へ変化したと見ることが出来ます。I_{para}相ではイオン化した分子がスピン自由度を有することから、磁場中ではI_{para}相が安定化されることが期待されます。そこで本研究では、磁場を用いて結晶内での電荷移動を制御的に誘起し、ファンデルワールス結晶からイオン結晶に変化する過程を精査することで、化学結合への磁場効果の理解を目指します。また、電荷移動の過渡領域で形

成されるスピンソリトンやN-Iドメインウォールが巨視的物性へ与える効果の解明、磁場による強誘電ドメインの制御によるマルチフェロイック現象などの機能性の探索を目指します。

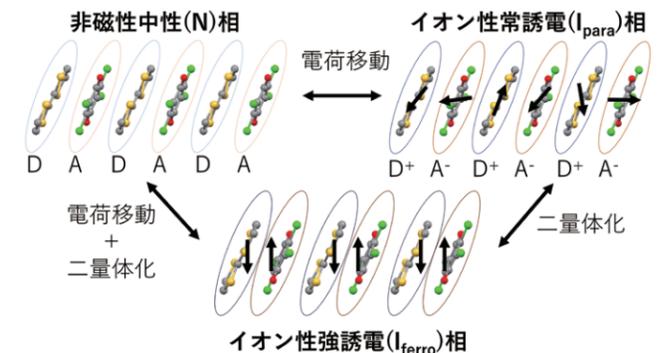


図 N-I転移物質TTFCAで観測される3相の関係図。

超強磁場を用いた多形磁性体における磁場応答機能の探索

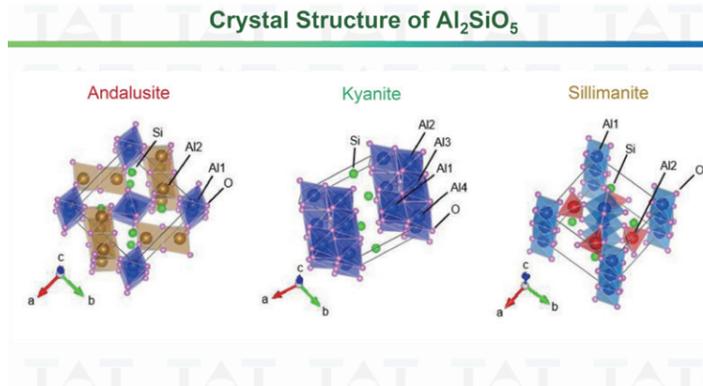


香取 浩子
東京農工大学工学研究院
教授

一巻きコイル法、電磁濃縮法による強磁場下での物性測定を成功させたい

多形とは化学組成が同じで結晶構造が異なる相が複数存在する物質を指す。本研究では多形である磁性体を多形磁性体と呼ぶ。鉱物 Al_2SiO_5 は、アンダルサイト、カイヤナイト、シリマナイトの3つの結晶構造の相が存在する多形である。我々はこの鉱物において、AlサイトをFeに置換、SiサイトをGeに完全置換した $\text{Al}_x\text{Fe}_{2-x}\text{GeO}_5$ が多形磁性体であることを見出した。 $0.09 \leq x \leq 0.26$ では 1150°C 以上でアンダルサイト相、 1050°C 以下でカイヤナイト相の試料が合成できる。この相変化を磁場で引き起こすためには 1000 T 級の磁場が必要であるが、本物質は磁性体であるため、ゼーマン相互作用の効果により、 1000 T よりも低磁場下で相変化が生じる可能性がある。また、カイヤナイト相からアンダルサイト相への相変化に伴った巨大磁歪も期待できる。そこで、 $\text{Al}_x\text{Fe}_{2-x}\text{GeO}_5$ の

磁化・磁歪・X線などの物性測定を一巻きコイル法・電磁濃縮法で発生した超強磁場下で行い、多形磁性体における磁場応答機能を探索する。



量子極限での結晶対称性の破れを超音波で測る

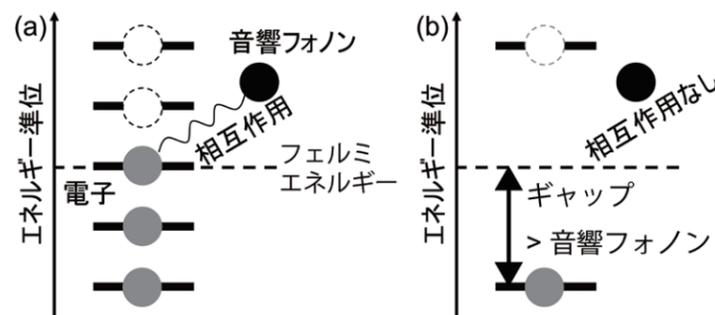


栗原 綾佑
東京理科大学創成理工学部先端
物理学科
助教

1000テスラ強磁場の学理に低エネルギー音響フォノンの理解をつけ加えたい

超音波を用いた物性実験に取り組んでいる栗原と申します。 1000 T 強磁場のメンバーに加わることができ、大変嬉しく思います。公募研究では、バンド電子が量子極限を迎え、かつ電子-格子相互作用が強力な場合に、構造相転移が生じ結晶対称性が低下する可能性はないのだろうか、という観点から実験を推進していきたいと考えております。超音波は、結晶が属する群の既約表現に従う歪みや音響フォノン振動を量子系に印加できます。また、低エネルギーかつ長波長のため、電子-格子相互作用を介してフェルミエネルギーのごく近傍に位置するランダウ準位を重点的に観測できるといった特性もあります。これらの性質を利用し、量子極限状態に由来する結晶対称性の破れの既約表現の決定や、量子振動測定による電子-音響フォノン相互作用の結合定数の決定を目指します。私の研究では非破壊パルス強磁場の利用を想定しているため、 60 T まで

の磁場でもバンド電子にとっては 1000 T 級の強磁場を感じる舞台を設定する必要があります。そこで、線形バンド構造に由来した 7 T という極小フェルミ面をもつ LaRhIn_5 と、その系統物質である LaIrIn_5 、および LaCoIn_5 に着目し、強磁場超音波計測を推進していく予定です。



超量子極限における創発電磁誘導現象の探索



ヒルシュベルガー マックス
東京大学大学院工学系研究科
准教授

パルス高磁場測定で人類の知識の限界を押し広げよう!

ランダウ量子化とは、強い磁場に曝されたときに電子が離散的な軌道に閉じ込められることであり、現代の物性物理学で広く評価されている豊かな多体相関現象の源となっている。例えば、二次元電子ガスでは、電子の量子化状態(ランダウ準位、LL) に依存して様々な電荷秩序やスピン秩序が実現する。一方、三次元磁性系におけるランダウ準位の観測は、その電子構造、すなわちフェルミ面を研究するための「受動的」プローブとして一般的に用いられている。ここでは、メソスコピックデバイスの磁化と電気インダクタンス実験を用いて、短い磁気周期 ($< 3\text{ nm}$)、高い臨界磁場 ($> 25\text{ T}$)、高磁場中の適度に小さな電子フェルミ面を持つ螺旋磁性体の研究を提案する。スピンドYNAMICSによって生成されるインダクタンス信号の新しく確立された理解に基づいて、我々は螺旋磁性体の低エネルギー励起、すなわちフェイゾンモードとチルトモードを検出することによって、磁気周期とスティフネスを正確に追跡することを目指す。本研究は、

ISSPのパルス磁場(最大60テスラ)での材料探索と精密測定からなり、 100 T の閾値を超える高磁場実験も視野に入れている。

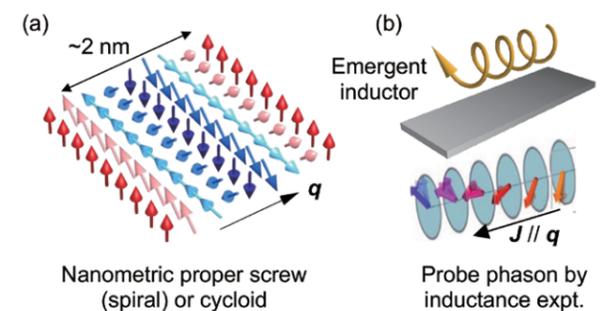


図 スパイラル磁石の高磁場インダクタンス測定研究の概念図。

ハニカム化合物ルテニウムハライドの磁場効果

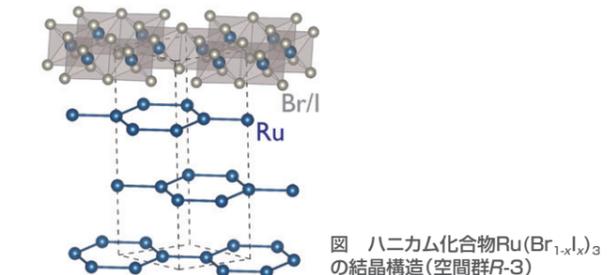


今井 良宗
東北大学理学研究科
准教授

ハニカム化合物と超強磁場の組み合わせでどのような量子相が現れるのか、とても楽しみです。

スピン軌道相互作用が卓越した遷移金属ハニカム化合物においてはカタエフ型相互作用が具現化することが知られており、中でも、 $\alpha\text{-RuCl}_3$ はカタエフ量子スピン液体の有力候補な物質として盛んに研究が行われている。本課題では、 $\alpha\text{-RuCl}_3$ の配位子サイトをBrやIで置換した $\text{Ru}(\text{Br}_{1-x}\text{I}_x)_3$ に着目する(図)。この系は私たちが最近見出した新物質である[1]。 RuBr_3 は $\alpha\text{-RuCl}_3$ と同様、低温でジグザグ反強磁性秩序を形成するスピン軌道モット絶縁体であり、 RuI_3 は半金属である[1]。配位子サイトがBrからIへと変化することで、 d - p 混成の増大に伴いオンサイトクーロン斥力が減少することがバンド計算によって示されており、バンド幅制御によるモット転移が RuBr_3 と RuI_3 の間で生じていると考えられる[1,2]。このように、 $\text{Ru}(\text{Br}_{1-x}\text{I}_x)_3$ は「カタエフ相互作用が具現

化した系におけるモット転移」という特徴を有している。私たちは、この系の磁場効果を明らかにし、新しい量子相を開拓することを目的として、磁場-磁化曲線や量子振動の測定などに取り組む。



関連文献

1. "カタエフスピン液体に着目した新物質開発 - 高圧合成法を用いた新しいルテニウムハライド RuBr_3 , RuI_3 の発見 -", 今井良宗, 大串研也, 那波和宏, 佐藤卓, 清水康弘, 山地洋平, 固体物理 57, 725-744 (2022).
2. "Insulator-metal transition in $\text{Ru}(\text{Br}_{1-x}\text{I}_x)_3$ with honeycomb structure", F. Sato, H. Fujihara, H. Gotou, T. Aoyama, Y. Imai, and K. Ohgushi, Phys. Rev. B, 109, 035154 (2024).

公募班紹介 B01

磁場によるフラストレート格子系の分子軌道結晶の融解



花咲 徳亮
大阪大学大学院理学研究科教授

強磁場を活かしてフラストレート格子の新しい物性を開拓したい

最も基本的な結合形態として分子の形成が挙げられる。遷移金属酸化物のような固体内でも、2量体などの“分子”を形成して非磁性の絶縁体になるものがある。フラストレート格子では、この“分子”の配置の仕方について多くの様々な状態を取りえる。しかし、物質はフラストレーションを解消するため、格子の対称性を下げて“分子”の配向を揃える傾向がある。例えば、私が研究してきたスピネル型チタン酸化物でもTi原子が2量体を形成する。この2量体化はアイスルールに従うが、低温で立方晶から正方晶へ構造相転移を起こし、2量体が整列してしまう。超強磁場技術の進歩によって、固体内の“分子”を解離させ金属状態に転移させた研究例も報告されるようになってきた。もし磁場によって2量体の結晶状態(分子軌道の結晶)を融解する事ができれば、分子軌道がランダムに配置したり共鳴的な状態になるのだろうか。フラストレート格子系の遷移金属化合物で見られる多量体や原子変位に着目し、強磁場を活かして新しい物性を開拓

していきたい。

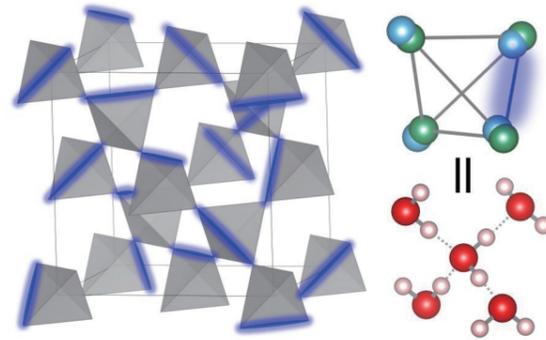


図 (右)パイロクロア格子の四面体における2量体化と、アイスにおけるH₂Oの配置との類似性
(左)パイロクロア格子においてランダムな配置を取る2量体の例

公募班紹介 B01

スピン-軌道-格子結合に対する超強磁場効果



巖 正輝
東京大学物性研究所助教

楽しく実験します！

大学院時代は、パルス超強磁場下での物性測定を専門としていました。今回再び1000テスラ科学に携わる機会が得られたことを光栄に感じると共に、身が引き締まる思いです。世界で誰も見た事がない相転移の最初の目撃者になれるのが超強磁場実験の魅力であり、皆様とその楽しさを共有しながら研究を進めていきたいと思ひます。

超強磁場領域の磁性研究は、従来は量子スピン系やフラストレート磁性体が主な研究対象でした。本研究ではヤーン・テラー活性な遷移金属化合物に着目し、軌道自由度がヤーン・テラー効果やスピン軌道相互作用を介してもたらす電子状態に対する超強磁場効果を調べます。最初の研究対象物質は、欠損スピネル化合物GaNb₄Se₈です。本物質は、室温では4つのNb原子が四面体クラスターを形成し、クラスター毎にS=1/2のスピンをもちますが、50K以下でクラスターの組み替えを伴うcharge order相[1]が、31K以下

で構造相転移を伴う非磁性状態[2]が発現します(図)。強い反強磁性のために非磁性状態は数十テスラまでは堅牢であり[2]、本研究では100テスラ以上の超強磁場誘起相転移を探索します。また、高感度磁化測定や縦横磁歪同時測定といった測定手法開発も行い、磁場誘起相におけるスピン軌道-格子結合の多角的検出を目指します。

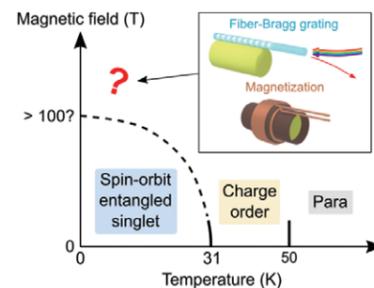


図 GaNb₄Se₈の超強磁場誘起相探索の概念図。

関連文献

1. S. Kitou et al., Chem. Mater. 36, 2993 (2024).

2. H. Ishikawa et al., Phys. Rev. Lett. 124, 227202 (2020).

公募班紹介 B02

「壊れない」では物足りない



浜崎 亜富
信州大学学術研究院理学系准教授

今度こそ!!

オランダのHigh Field Magnet Laboratoryで開催された、ある学会のエクスカージョンで美術館を訪れた時のこと。私の目をクギづけにしたのは、言葉通り、釘を溶接して作られたオブジェで、細胞膜モデルとしても知られる“リポソーム”の断面構造にそっくりでした。リポソームはリン脂質の分子集合体で、球状脂質二分子膜のことです。私は学生の時、ミセル内に分子を閉じ込め、パルス磁場を印加して光化学反応への磁場の影響を研究していました。ある時「ミセルのような分子集合体は磁場で壊れないの?」と聞かれましたが、その時は答えられませんでした(この実験では「壊れない」ではない)。その後、就職先でリポソームへのパルス磁場(20T)の影響を研究し始めました。ミセルに比べてリポソームは反磁性磁化率の異方性に起因した磁気トルクを誘起しやすい構造です。オランダで美術館を訪れたのはこの頃で、作品の、いかにも磁場の影響を受けそうな構造異方性の表現に嬉しくなりました(作者にはそんな意図はなかったと思

う)。ただし、リポソームが瞬間的に破裂するのでは?と思ひとは裏腹に、それは簡単に壊れませんでした。さて、そこからさらに10年ほど経過した今、圧倒的な強度のパルス磁場を目の前に、今度こそは!という気持ちです。



公募班紹介 B02

カーボンナノチューブの励起子エンジニアリング



高口 豊
富山大学学術研究部都市デザイン学系教授

領域内共同研究を強く希望しています。よろしくお祈りします。

半導体性カーボンナノチューブ(SWCNTs)は、太陽光吸収材料として優れた特性をもつ。本研究では、SWCNT/C₆₀ ファンデアワールスヘテロ接合を用いた人工光合成(2H₂O + 光エネルギー → 2H₂ + O₂)を明らかとした。この活性向上の鍵は、SWCNT上の励起子からC₆₀への電子抽出速度の向上であるが、SWCNTsの励起子の挙動については未解明な点が多い。そこで、本領域研究では、界面の電子移動速度に対する磁場効果を明らかとするとともに、超強磁場中で観測されSWCNTsの暗い励起子の吸収帯を利用した検討を進める。

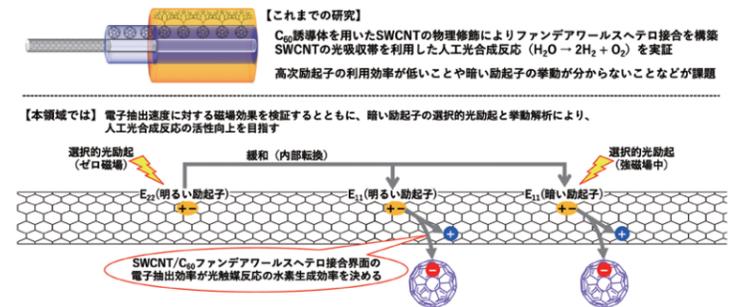


図 CNT光触媒の構造、および、電荷分離状態生成過程

関連文献

1. "Carbon-Nanotube-based photocatalysts for Water Splitting in Cooperation with BiVO₄ and [Co(bpy)₃]^{3+/2+}" T. Izawa, V. Kalousek, D. Miyamoto, N. Murakami, H. Miyake, T. Tajima, W. Kurashige, Y. Negishi, K. Ikeue, T. Ohkubo, Y. Takaguchi, Chem. Lett. 5, 410 (2019)
2. "Dye-sensitized H₂ Evolution from Water Facilitated by Photoinduced Electron Transfer between Molecules on the Inside and the Outside of a Carbon Nanotube" T. Tajima, M. Yamagami, R. Sagawa, H. Miyake, Y. Takaguchi, J. Appl. Phys. 129, 014303 (2021).

公募班紹介 B02

金属ナノ粒子を活用した光触媒に対する磁場効果



米村 弘明
崇城大学工学部
教授

チャレンジングな研究課題ですが、
成果が得られるよう頑張ります。

光化学反応に対する低磁場効果に関する多くの研究では、これらの効果が数%程度である報告例が多い。これに対して、(超)強磁場を活用すると、非常に大きな磁場効果や新規の磁場効果が期待できる。また、異方性による磁化率の差を利用する弱磁性物質の磁場配向では、磁場配向可能かは対象物質における分子数に依存する。(超)強磁場を活用すると、ナノ領域の構造体を磁場によって配向および構造変化させる事が期待できる。さらに、触媒や光触媒における活性点を磁場によって変化させる事も期待できる。

粒子のプラズモン光励起で生ずるホットキャリアが与える光触媒反応に対する磁場の影響についても検討する。加えて、光触媒を作製する際に(超)強磁場プロセッシングを行い、界面における活性点のナノ構造を改質し、新規光触媒反応を創出する事を目指す。

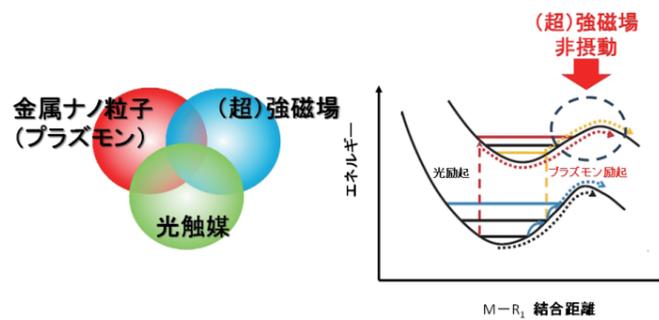


図 研究目的の概念図と期待される非摂動磁場効果

そこで、本研究では、光触媒に対する磁場効果においてキャリア移動に及ぼす磁場の影響を高感度で評価できる手法を開発すると共に、磁場によるローレンツ力や原子欠陥によるスピン分極や負の磁気抵抗など活用して、光触媒反応の促進や光生成物の選択性向上を図る。また、プラズモニック光触媒における金属ナノ

公募班紹介 B03

非摂動磁場が存在する系における Weibel 不安定性の非線形発展

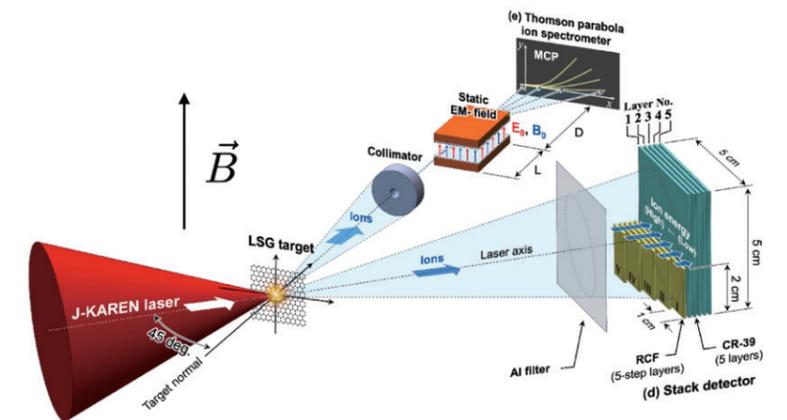


蔵満 康浩
大阪大学大学院工学研究科
教授

準相対論的磁化プラズマ実験室
宇宙物理の創成

Weibel不安定性は、対向流プラズマが存在する宇宙空間の幅広い天体現象で起こると考えられており、大型レーザーを用いた原理検証が行われてきた。近年では、非摂動磁場が存在する系における Weibel不安定性が引き起こす自発的な磁気リコネクションの非線形発展が注目を集めている。大型装置では、装置の制約から磁場を印加した実験は難しかったが、高強度レーザーを用いることで、高速で高密度、かつ無衝突の対向流を生成可能であり、さらに実験系をコンパクトにすることができ。実験系をコンパクトにすることで強磁場を印加することが可能である。本公募研究では、高強度レーザーを用いた Weibel不安定性の実験を念頭に、本研究領域で整備する可搬型パルス磁場装置を用い、高強度レーザーと強磁場との共創により、これ

まで未踏領域であった準相対論的磁化プラズマを用いた実験室宇宙物理を開拓する。



公募班紹介 B03

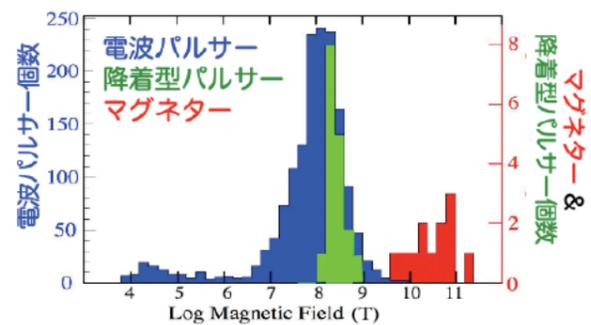
X線観測で探るマグネター天体の超強磁場



牧島 一夫
東京大学大学院理学系研究科
名誉教授

中性子星は、電磁石か永久磁石か？

中性子星の双極子磁場は典型的に 10^8 Tに達するが、この磁場がどのように形成・維持され、時間変化するか、特にそれが電磁石か永久磁石か、いまだ謎である。その鍵を握るのが、マグネター(magnetar)と呼ばれる一群の中性子星で、その双極子磁場は 10^{10} Tに達する。我々は数例のマグネターのX線観測で、自由歳差運動の検出に成功し、それが磁気圧による星の変形の結果と考え、内部に 10^{12} Tに達するトロイダル磁場が潜むことを発見した。本研究では宇宙X線の公開データ解析を続行し、代表的なマグネターの内部磁場を一網打尽に測定したい。



直交ダイマー系物質 SrCu₂(BO₃)₂ の飽和磁場までの物性解明

A02 野村 肇宏 (静岡大学)



物質に磁場をかけて無理やりにスピンを揃える。これは強磁場科学の醍醐味であり、その過程で出現する未知の凝縮相は我々をさらなる超強磁場へと駆り立てるものです。SrCu₂(BO₃)₂はそんな強磁場研究の本流を作ってきた物質です[1]。結晶構造は図(a)に示すように、Cu²⁺イオンがダイマーを形成し、互いに直交しながら二次元面内に整列しています。ダイマー内の相互作用は反強磁性的で、基底状態はスピンS=0の非磁性です。ここに磁場をかけると励起状態であったS=1の状態が安定化し、いくつかのダイマーがトリプルとして磁性を獲得するようになります。このとき、トリプルは一齐に現れるのではなく、1/4や1/3といった割合で部分的に出現し、互いに退け合いながら超格子パターンを形成します。これは磁化プラトーと呼ばれる状態で、磁化は超周期構造を反映して飽和値の1/4や1/3に量子化されます。SrCu₂(BO₃)₂の磁化過程は1/8、2/15、1/6、1/4、1/3、1/5、1/2といった多様なプラトー相に彩られ、研究者を惹きつけてきました。今回、我々は150テスラまでの超音波測定により初めて磁化飽和(言うなれば1/1プラトー相)に至る実験結果を得ることに成功しました[2]。また、オランダとスイスの理論チームと共同で、14x14という巨大な超格子を持つスピン超固体相や、これまで予言されていなかった1/2スピン超固体相の存在を提案しました。

図(b)は上から超音波音速、磁歪、磁化の実験結果です。このうち、超強磁場における超音波計測は2021年に開発された新たな手法[3]で、系の対称性に敏感なプローブです。図(a)に示すように、音波による歪み場は縦波と横波で異なる対称性を持ち、物質中でスピン間距離を変調します。超格子の周期性が歪み場の周期性と合致すればエネルギーも変調されますが、合致しない場合は結晶全体で平均した際に打ち消し合うことになります。そのため、同じ横波(c₆₆モード)でも超格子の対称性ごとに超音波応答は大きく異なり、逐次的な相転移を高感度に検出することができます。

超音波測定はスピン系以外にも、電荷秩序や構造相転移に由来した対称性の変化を議論する上で有意義な手法です。また、液体やソフトマターの弾性に関する情報を得ることができるため、本領域で扱う多種多様な物質に応用できる可能性があります。

- [1] H. Kageyama *et al.*, Phys. Rev. Lett. 82, 3168 (1999).
- [2] T. Nomura *et al.*, Nat. Commun. 14, 3769 (2023).
- [3] T. Nomura *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 92, 063902 (2021).

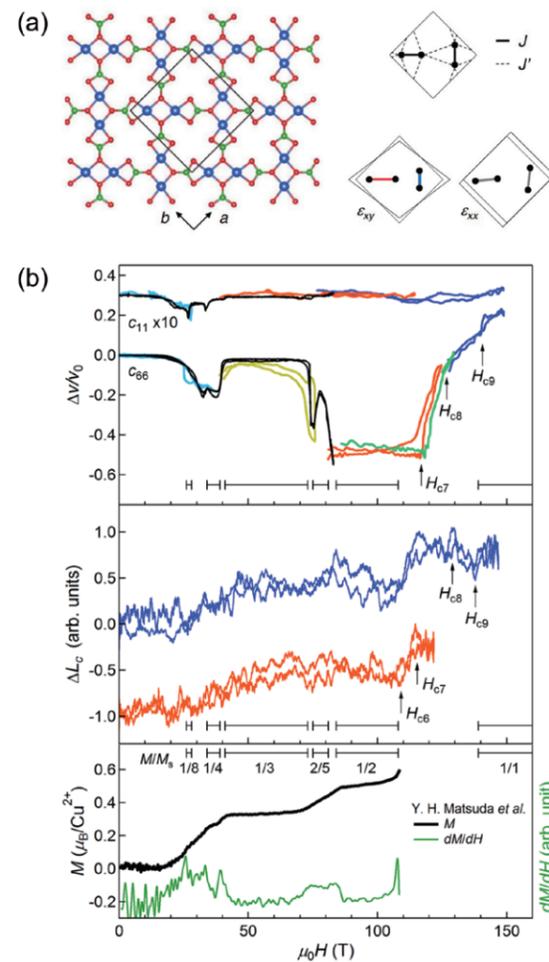


図 (a) SrCu₂(BO₃)₂の結晶構造と歪んだ単位包。(b) SrCu₂(BO₃)₂の飽和磁場までの実験結果。上から、超音波音速の相対変化、磁歪、磁化の磁場依存性。

超伝導量子ビットを使った波状ダークマター探索

A05 陳 詩遠、新田 龍海、稲田 聡明 (東京大学素粒子物理国際研究センター)



波・ダークマター

宇宙の8割を占める未知の質量・ダークマター。宇宙物理学からは詳細に理解されているにも関わらずその素粒子的正体は未だ謎である。加速器・原子核反跳などを用いた大規模実験によって重いダークマターに厳しい制限がつけられる中、軽いダークマターの探索はまだ手薄で近年新たなフロンティアとして注目を集めている。特にeV/c²以下の質量になるとマクロスコピックなdeBroie波長(>mm)と数密度(>10⁸/cm³)によってもはや粒子ではなく波の性質を帯びるようになり、全く異なる検出原理が求められる。実験屋としてはやる気が出る。理論的にも軽いダークマターにはしっかりとした動機があり、超紐理論から自然に導出されるダークフォトンや、強いQCD問題から存在が示唆されるアクシオンが有力候補である。アクシオンの場合(μeV - meV) / c²の質量が特に最も好ましいとされている。これは波としては概ねマイクロ波領域である。

超伝導量子ビットでダークマターからの光を捉える

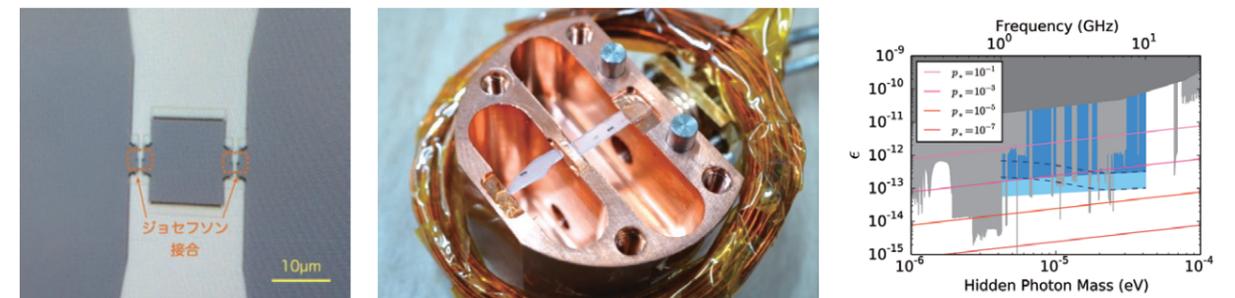
ダークフォトンとアクシオン、どちらも微弱ではあるが電磁相互作用をするため、光子に転換することで検出可能である。特にダークフォトン・ダークマターは通常的光子が少しだけ混ざった質量固有状態として存在しているので、何をせよとも既にちょっと光になっている。昨年我々はこれを超伝導量子ビットで検出する探索実験を着想し[1]、現在実験が鋭意進行中である。量子ビットは一般にノイズに極めて弱いですが、一方でこれはセンサーとして高いポテンシャルがあることも意味する。10mKの極低温環境で運用される超伝導量

子ビットは熱ノイズや外部の電磁ノイズから見事に隔離されており、現在マイクロ波領域の最も高感度なセンサーの一つである[2、3]。ダークマターからの光子のエネルギーが量子ビットの|0>と|1>のエネルギー差(ΔE)に共鳴しているとき量子ビットの励起率が跳ね上がるが、我々はΔEを掃印して励起率が特異的に高い周波数を探している。ラジオの周波数を探すような作業である。

アクシオン探索に向けて

アクシオンは磁場をかけると光子に転換するため、磁場をかければダークフォトンのときと同じセットアップで探索ができる。転換レートはB²に比例するので磁場は強ければ強いほどよいが、ご存知の通り磁場は超伝導の天敵であり、ましてや強磁場中の超伝導量子ビットの運用は自明ではない。事実10mT程度の面直磁場があるだけで、薄膜を貫く磁束との結合を通じて量子ビットの緩和は著しく速くなることが知られている。一方で磁場を厳密に面内方向にかけてこの緩和チャンネルを封じた場合は1T近くまで持ち堪えるという報告も出てきており[4]、超伝導量子ビットの強磁場耐性の限界は現在色んな分野の興味を巻き込んだopenquestionである。これらの研究を経たのち、数年のうちに最強磁場を用いた探索実験ができることを期待している。

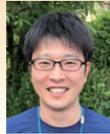
- [1] S. Chen, H. Fukuda, T. Inada, T. Moroi, T. Nitta, T. Sikanugrist, Phys. Rev. Lett. 131, 211001 (2023).
- [2] S. Kono *et al.*, Nat. Phys. 14, 546 (2018).
- [3] A. V. Dixit *et al.*, Phys. Rev. Lett. 126, 141302 (2021).
- [4] J. Krause *et al.*, Rev. Applied 17 034032 (2022).



(左) 超伝導量子ビットの概観 (SQUID型トランズモン)。超伝導薄膜のキャパシタンスパッドとジョセフソン接合で形成される非線形LC回路である。(中) 超伝導量子ビットを搭載した空洞共振器。共振器のマイクロ波応答を通じて量子ビットの読み出しを行う。量子ビットの変調は周囲に巻いたコイルでSQUIDに磁束を通して行う。(右) 新実験の予想感度[1]。縦軸はダークフォトンと光子の混合度。灰色が既に棄却されている領域、青が1年間の測定で探索可能な領域。

コバルト酸化物 LaCoO₃ の新状態を 600 テスラの超強磁場まで解明

A02 池田 暁彦 (電気通信大学)



電磁濃縮法装置によって発生した 600 テスラまでの磁場を利用して、スピン状態自由度をもつ LaCoO₃ において非自明なスピントロニクスを誘起した研究成果について報告します。測定は磁歪計測を利用しました。成果は論文 [1, 2] として出版されています。

コバルト酸化物ではイオンの電子状態として異なる全スピンを有する高スピン状態 (S = 2)、低スピン状態 (S = 0) などのエネルギーが拮抗しているため、これらの異なるスピン状態間を移り変わるスピントロニクスオーバーが生じ、大きな物性変化をもたらす点が興味を持たれています。スピン状態は実際は電子基底状態の違いであり、体積・磁性・励起構造など全てが異なる性質を有しています。このためスピントロニクスオーバーは温度、圧力、光、磁場などの多様な外場で誘起できます。

中でも LaCoO₃ は温度変化によるスピン状態が 2 段階で起こり、高温の転移には金属絶縁体転移も伴います。このため電子相関を持つスピントロニクスオーバー系として、その原理について半世紀以上の議論が続いています。その中で高スピン状態、低スピン状態に加えて中間スピン (S = 1) 状態も関与している可能性が指摘されてきました。また最近では、高スピン状態や中間スピン状態を励起子として見直し、その励起子のポーズアインシュタイン凝縮が起こっている可能性などが議論されています。

LaCoO₃ は基底状態が低スピンの非磁性絶縁体です。励起状態は高温状態として温度で誘起する必要があるため、実験の結果には有限温度効果としてぼやけが乗ってしまい詳細な性質が把握できず、今でも議論が収束していません。そこで我々は基底状態に磁場をかけ、低温で磁場誘起スピントロニクスオーバーを起こすことで、磁気的な励起状態をシャープに解明することを目的として研究を行ってきました。しかし実際得られた実験結果は予想を超えて、シャープではあるものの、むしろ温度依存性の強い転移磁場が複数観測されました (図)。これはゼロ磁場励起状態の性質をそのまま表しているというよりも、むしろ磁場中でのみ発現する新しい量子相を観測したものと解釈しています。つまり孤立したイオンの電子状態を基本としつつ、電子の遍歴性や電子相関などの相互作用が支配していることが示唆されています。新しい量子相の候補はまだわかりませんが、スピン三重項励起子が相互作用によって、固体状態になったもの、超流動状態になったもの、そのどちらもおこり超固体になったもの、を初めとして多様な量子相の可能性が提案されています。スピンを有する励起子の超流動はスピントロニクスの観点からも重要であり、将来の実験技術の発展により、このミクロな起源の解明がなされることを期待しています。

現在、私たちは LaCoO₃ では低スピン状態を真空として考え、そこに磁場をかけることで磁気的な励起子を出現させるという描像で考えています。その励起子が遍歴性や引力・斥力相互作用を有し、さらにスピンも持つために多様な多体秩序状態が発現し、その間の相転移が磁場で逐次的に誘起されていると考えています。本領域には本物の真空に磁場をかけているグループがあり、非常に刺激的だと考えています。本物の真空場に磁場をかけることで真空偏極度の予言値を検証したり、アクシオンなどの新粒子探索も実際に行われています。これらの研究の狙いを、コバルト酸化物の研究に活かすことができるのか、考えていかなくてはいけないと思います。逆にコバルト酸化物の研究例からのアナロジーを考えることも出来ます。仮に、10¹⁰ テスラ程度の極限的磁場があれば、磁場によるシュウィンガー機構を起こすことができ、結果として真空場からスピン三重項のパラポジトロニウムを取り出すことができるのではないかと考えています。本物の真空場に対するスピントロニクスオーバー効果です。

LaCoO₃ では非磁性体に磁場をかけると磁石になるという、当たり前ではないことが起こっています。現在、領域では非磁性体に磁場をかける研究が多く見られます。従来は磁場中で磁石は向きを変えろということが考えられま。一方で LaCoO₃ の場合、むしろスピンを伸ばす、もしくはないスピンを有限にする、という考えが重要でした。プラズマや半金属の研究ではそうではなく、むしろ電子の軌道運動に働くローレンツ力が現象を支配していると思受けられます。コバルト酸化物においても那須グループによってローレンツ力の効果が検証され始めています。こういった領域内の相互作用の中から、当たり前ではない、真に驚くべき結果が生まれるのではないかと期待しています。

[1] A. Ikeda, Y. H. Matsuda, K. Sato, Y. Ishii, H. Sawabe, D. Nakamura, S. Takeyama, J. Nasu, Nat. Commun. 14, 1744 (2023)

[2] A. Ikeda, Y. H. Matsuda, K. Sato, J. Nasu, J. Phys. Soc. Jpn. 93, 121005 (2024) (Invited Review)

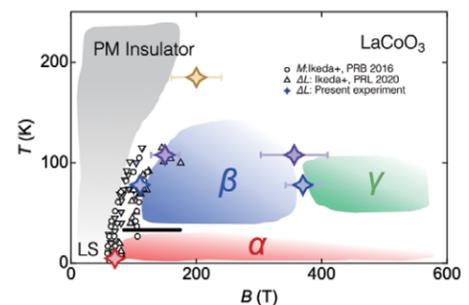
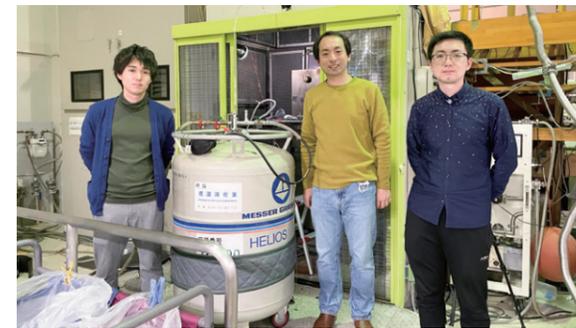


図 600テスラまでの磁歪計測により作成したLaCoO₃の超強磁場相図。α、β、γ相が、スピン状態結晶やスピン三重項励起子凝縮状態などの新規状態である可能性を議論している。

100テスラの世界を急速凍結して持ち帰ろう

A02 大池 広志 (物質・材料研究機構ナノアーキテクニクス材料研究センター)



とあるジャズピアニストが「誰かとセッションをすることで、自分の発想を超えた音楽が生まれる。」と言っていた。一観客である私からは、彼の即興のソロピアノ演奏には、楽譜や他人に縛られない自由な空間が無限に広がっているように見えていた。しかし彼曰く、ジャズの即興は自分の得意な演奏パターンに収束することが多いそうだ。準安定な音楽にトラップされていると言えるだろう。そして誰かとセッションをすることで準安定状態を抜け出し、新しい音楽が生まれるのだと解釈できる。それは、音楽家同士の強い相互作用による音楽のカタストロフィーかもしれない。

共同研究はジャズのセッションに似ている。個人で進める研究は、実験装置、合成・測定技術、個人の発想などによって制限される。これらの制限は、研究者の個性を表すものだろう。音楽家にとっての楽器、演奏技術、音楽性に対応するかもしれない。個性を磨いて独自の研究を展開することが重要であるのは間違いない。しかし、それだけでは研究が準安定状態にトラップされるようにも思われる。共同研究というセッションによって準安定状態を抜け出すことができれば、新しい研究の展開が広がる。そんな期待を持ちながら進めている、東京大学物性研究所 国際超強磁場施設での共同研究を紹介する。

私が持っている技術は、ナノ秒から秒程度のタイムスケールで温度を急激に変化させることである。温度というのは不思議なパラメータである。熱力学によると、温度とエントロピー、圧力と体積、磁場と磁化、電場と分極がペアになってエネルギーに寄与する。エントロピーは不可逆性と関係した物理量で、体積、磁化、分極と比べると実態がつかみにくい。「エントロピー = kln(状態数)」という統計力学の考え方を知らないと一歩理解が進んだ気になるが、温度を上げ下げするときに「状態数を増減させている！」という実感はあまりない。温度を実感するために、実験でどのように温度を上げ下げするかを考えてみる。加熱するときには、燃焼反応、電流によるジュール発熱、レーザー光の吸収など汎用的な手法が思いつく。一方で冷却するときには、断熱膨脹、断熱消磁、He4 と He3 の混合、ペルチェ冷却などが思いつくが、加

熱に比べると実験装置に組み込むことは容易ではない。グラフの横軸の右に行く操作と左に操作が全く異なるというのも、よく考えると不思議である。

通常の低温実験では、1分で1ケルビン変化させる程度の冷却速度で物性測定を行う。これ以上速く冷却すると温度計と試料の間に温度差が生じてしまうためである。ゆっくり冷却して試料と温度計の温度差をなくすことで、試料の物性値と温度の対応関係を知ることができる。この常識から一度外れて、1ケルビンを変化させる時間を1秒、1ミリ秒、1マイクロ秒、1ナノ秒と速くして行くと何が起きるかを知ることが、私が取り組んで来た研究だ。低温物性の分野では急冷は常識的ではないが、人類は2000年以上にもわたって急冷を使い続けてきた。最も古くから知られているのは鉄鋼の焼き入れであり、鉄と炭素を混ぜて熱して急冷することで、準安定状態として硬い鉄鋼を作ることができる。このような冶金学が発展し、現代ではレーザーで局所的に加熱と急冷を繰り返して立体構造を自在に作るできるようになり、3Dレーザープリンターの技術が確立している。低温物性の研究で急冷を行うことは、極低温の冶金学とも言える。

2年前の学術変革の申請で突然声がかかり、私は強磁場業界に関わり始めた。それまでは強磁場業界と言えば、一瞬の強磁場を生み出すために莫大な労力を注ぎ込む、謎の集団という印象であった。それは、オリンピックの記録争いをテレビでは見るけど、自分も参加しようとは思わないような感情だ。正直なところ、「一瞬の強磁場を生み出すことに何の意味があるのだろうか」という否定的な感情も含まれていた。今もこの疑問は持ち続けている。しかし、自分が積極的に関わることで肯定的なニュアンスに変化した。一瞬の強磁場に何か意味を持たせてやろうではないかと。私も謎の集団の一部になりつつあるのだろうか。

1000 テスラの電磁濃縮では、最大磁場に到達した直後に、試料はライナーの収縮に巻き込まれて2度と手に取ることができない。我々にできることはその瞬間を確かに見届けることだけだ。しかし100 テスラのシングルターンコイルでは、コイルが外側に弾け飛ぶので試料を回収できる。つまり、試料は100 テスラの世界に旅立った後に、我々の世界に帰って来るということだ。それならば、100 テスラの世界を急速凍結して持って帰ってもらおう。これが共同研究の目標である。

シングルターンコイルに大電流を流すと強磁場が発生し、コイルが弾け飛ぶとゼロ磁場に戻る。この磁場の上がり下がりには、10 マイクロ秒の間に起こる。したがって、強磁場状態を急速凍結するためには、それよりも速く温度を下げる必要がある。では、どうしたらマイクロ秒スケールで温度を下げられるのか。熱は温度が高い方から低い方へ流れる。そ

の勾配を急にすることが、急冷法の原理のほぼ全てだ。微細加工で作った細線に電流を流してジュール熱で局所加熱すると、急な温度勾配を作ることができる。磁場がピーク値に達するタイミングと電流を切るタイミングを合わせると、強磁場中で急冷できるはずだ。

この大雑把な全体像を現実に落とし込む必要がある。ここに多くの障害があるのは必然であり、後から振り返ればそれが研究の醍醐味なのだろう。しかし、私にはそのように考える余裕もなく、障害に思考がトラップされ、視野が狭まって全体像を見失ってしまう。幸運なのは、共同研究者の石井裕人さん（東京大学 物性研究所）が常に全体像を意識させてくれていることだ。初回のミーティングでは、大目標を共有すると同時に、細かい目標を多く設定することに時間をを使った。このおかげで、数日のマシナタイムで大目標に到達できなくても、全体像の中のどこまで進んでいるかを把握でき、達成感を得ることができる。すると自然と次にやるべきことに意識が向く。

もう一つ幸運なのは、さきがけ「未来材料」の伊藤佑介さんが指導している学生の孫慧傑さん（東京大学 機械工学専攻）が共同研究に加わったことである。孫さんはパルスレーザーを使った超高速制御・計測が専門であり、急冷手法を学ぶことで新しい研究の展開を作ろうとしている。彼にとって低温、磁場、抵抗測定は全て初めてのことであるが、日々新しいことを吸収して研究の推進力になっている。異なるバックグラウンドの研究者間の相互作用によって、ここからまた別の大きなプロジェクトが育つ期待感がある。

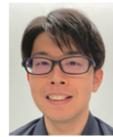
このように、100 テスラの世界を急速凍結して持ち帰るプロジェクトはまさに進行中である。このプロジェクトは私が強磁場業界と巡り合わされたことで始まっており、そのきっかけを作った慧眼の持ち主に感謝したい。さきがけ未来材料や1000 テスラ学変を起点として良い縁が連鎖して、研究の楽しさがどんどん膨らんでいるのを実感している。研究者同士の強い相互作用で科学のカタストロフィーを起こせるかもしれない。

若手海外派遣報告

学術変革A「1000テスラ超強磁場による化学的カタストロフィー」

2023年度採用分 若手研究者海外派遣プログラム 報告書 原子層物質における層間摩擦特性の解明

A03 瀬尾 優太（東京大学生産技術研究所）



概要

本海外派遣ではトロント大学のTobin Filletter教授の研究室において原子層間の摩擦特性に関する研究を行った。原子間力顕微鏡(AFM) カンチレバーの探針部分を原子層で覆った原子層探針という新しい技術を用いることで、原子間力顕微鏡法の1種である摩擦力顕微鏡法によりカンチレバー上の原子層物質と基板の原子層物質間の摩擦特性を調べた。

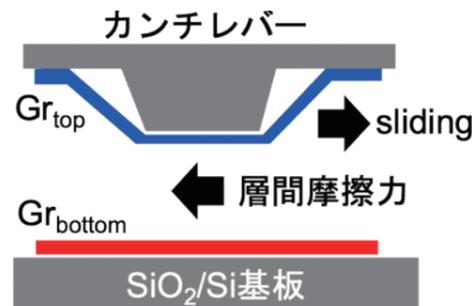


図1 原子層探針を用いた層間摩擦測定。

試料作製

原子層探針は市販のSiチップレスカンチレバーをFocused

Ion Beam (FIB) 装置を用いて加工して作製した専用カンチレバーに、原子層を転写することで作製した。図2にカンチレバーの作製過程を示した。まず、チップレスSiカンチレバーに対してFIBデポジションを用いてPtピラミッド構造を形成する。ピラミッドの形状は高さが約1.2 μm 、先端部分のプラトーの幅が約500 nmで作製した。この形状により、①ピラミッド上に原子層を転写する、②ピラミッド先端に平坦な原子層面を作製する、ことが可能となる。続いて作製した専用カンチレバー

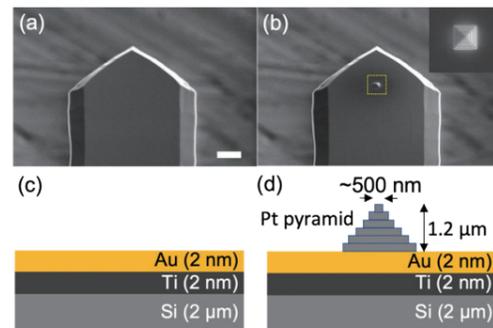


図2 カンチレバーの作製。(a)、(b) FIBデポジションによりPtピラミッドを作製する(a)前、(b)後のSiカンチレバーのSEM像。スケールバーは10 μm 。(c)、(d) FIBデポジションによりPtピラミッドを作製する(c)前、(d)後のSiカンチレバーの模式図。

チレバー上にドライ転写法と呼ばれる原子層転写方法を用いて原子層を転写する(図3)。テープを用いてSiO₂/Si基板上に機械的に劈開したグラフェン(Gr)、六方晶窒化ホウ素(hBN)をポリマー上に持ち上げ、それをPtピラミッドを形成したカンチレバーと接触させることで、Gr/hBN構造のみをカンチレバー上に落とすことができる。このようにして最表面に原子層が露出した原子層探針を作製した。図3 (b) は実際に作製した原子層探針の一例である。赤点線の内側にグラフェンが位置しており、グラフェンとPtピラミッドの間にhBN(青点線内側)が挟んである。hBNはグラフェンの平坦性を向上させるために用いた。

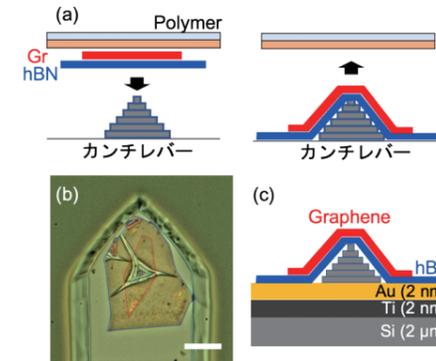


図3 原子層探針の作製。(a) 原子層転写法の模式図。(b)、(c) 原子層探針の(b) 光学顕微鏡写真と(c) 模式図。スケールバーは20 μm 。

測定結果

作製した原子層探針を用いて原子層探針上のグラフェンと基板上の三層グラフェン(TLG)間の摩擦特性を摩擦力顕微鏡法を用いて調べた(図4)。本研究では、基板を回転させることでグラフェン間の結晶方位のツイスト角度を変化させた複数点で摩擦力を測定した。図4 (c)、(e) はそれぞれ図4 (b) の状態($\theta = 0^\circ$) から -20° だけ三層グラフェンを回転させた状態を得られた三層グラフェンの形状像と摩擦像である。形状像・摩擦像の両方で三層グラフェンの形状を反映した像が得られている。摩擦像においては、探針上のグラフェンとの摩擦が、三層グラフェン部分(実線内側)よりもSiO₂基板部分において大きくなっている。一方で、図4 (d)、(f) は $\theta = 5^\circ$ の時の形状像および摩擦像である。この角度では -20° の時とは反対に三層グラフェンとの摩擦の方がSiO₂基板との摩擦より小さくなっている。この結果はツイスト角度の変化により、グラフェン間の摩擦が変化していることを意味している。摩擦力のツイスト角度依存性をより詳細に調べた結果を図5に示す。およそ 60° 周期と推定される摩擦力の角度依存性が観測されている。これはグラフェン間の格子整合を用いて説明される。グラフェン間の摩擦力は格子が整合した状態すなわち結晶方位のツイストがない状態で大きくなるとされている。グラフェンを回転させていくと一旦は格子整合していない状態が形成され摩擦力が小さくなるものの(図5中 $\theta = 5^\circ$ 付近)、グラフェンの結晶構造は6回対称であるため 60° 周期で格子が整合する状況が成立し摩擦力が大きくなるのである(図5中 $\theta = -20^\circ$ 、 30°

付近)。このように本研究ではグラフェン間のツイスト角度を反映した摩擦特性が観測されており、原子層探針を用いた本手法が原子層間の摩擦測定において有効であることが示された。

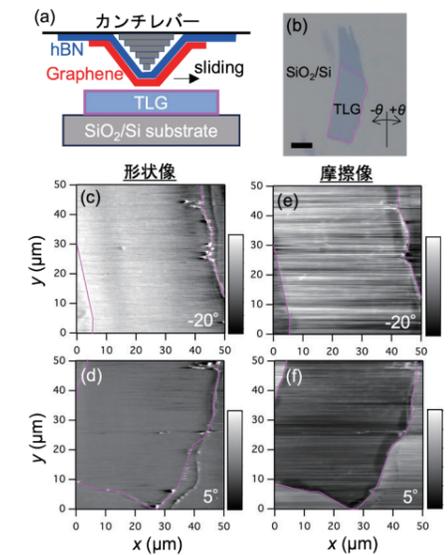


図4 原子層探針を用いた層間摩擦測定。(a)原子間力顕微鏡測定の模式図。(b)基板上三層グラフェンの光学顕微鏡写真。スケールバーは30 μm 。(c)、(d)基板上三層グラフェンの(c) $\theta = -20^\circ$ 、(d) $\theta = 5^\circ$ の時の形状像。(e)、(f)基板上三層グラフェンの(e) $\theta = -20^\circ$ 、(f) $\theta = 5^\circ$ の時の摩擦像。

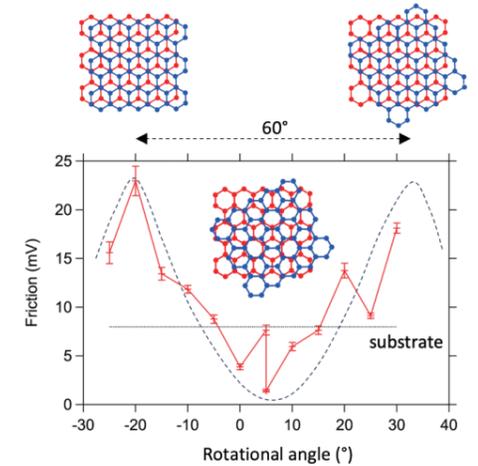


図5 層間摩擦力のツイスト角度依存性。

まとめと今後の展望

ここまで述べたように、本海外派遣において原子層探針を用いることで原子層間の摩擦測定が可能であることが実証された。一方で、派遣先での研究を通して原子層探針の構造を改善する必要があることが明らかになった。今後は原子層探針の改善を行い、より正確な角度依存性の検証を目指すとともに、カンチレバーおよびAFM装置の校正を行うことで摩擦力の定量的な評価を行えるようにしたい。魔法角付近におけるグラフェン間の摩擦力を定量的に評価することで、強磁場中でのツイストグラフェンの物性をより詳細に理解することを目指している。

ラマンスクール報告

A01 塚田 真也 (島根大学)



ラマン分光法の習得を目的として、2024年3月13日(水)から15日(金)に島根大学で「Raman School for 1000 Tesla Science」を開催しました。博士課程学生2名・博士研究員1名・主任研究員1名(内3名が外国人)が参加し、島根大学の修士課程学生2名も講義のみに参加しました。講師は、A01班の大和田さんと塚田が務めました。スクール内では英語を公用語として使用し、外国人参加者と円滑なコミュニケーションを図りました。

初日午後：自己紹介と講義(構造相転移・光散乱)

スクールは自己紹介からスタートしました。各参加者は、事前に用意したスライドをもとに自己紹介し、自身の研究内容を披露しました。参加者の研究領域は幅広く、「磁場下の誘電率測定」や「X線粉末構造解析」、「光量の高感度計測」と多岐に渡りました。1人5分程度を想定していましたが、質問が多数出たため、自己紹介のみで1時間以上を費やしてしまいました。続いて、1時間30分の講義を2つ実施しました。1つ目は、大和田さんが相転移を研究することの学問的な意味づけを行い、さらに光が相転移ダイナミクスの研究にとても良いプローブである事を紹介しました。2つ目は、塚田が光と物質の相互作用、特に今回の主題であるラマン分光法に焦点を当てた話をしました。講義後の議論では、A01班で計画している磁場中の電子や格子ダイナミクスの計測ではどういったポイントに注目したらよいかなど、結晶構造やフォノンといった視点から議論しました。



初日の自己紹介や講義の様子。

2日目終日：実験実習(偏光顕微鏡観察・ラマン散乱の測定)

最初にラマン分光装置の紹介をしました。初日の講義で紹介された光学系概念図と、光学定盤上に配置された光学素子や装置群とを対応させ、幾何光学に基づき光の通り道を一つずつ確認しました。さらに、回折格子やCCDカメラなどの装置の仕組みも詳細に説明しました。装置について理解が深まったところで、次に参加者が持参した試料を測定しました。まずは、ラマン分光装置に搭載されている偏光顕微鏡で「磁場印加後のBaTiO₃単結晶2枚」の強誘電分域を観察しました。縞状の分域が観察され、BaTiO₃の正方晶相で発生しうる分域パターンを基に、今回観察されている分域がどういったタイプのものかを議論しました。

午後からは、ラマン散乱測定による分域配列の検証を行いました。先に装置の使い方を習得した参加者が他の参加者に指

導を行う場面が見られました。偏光顕微鏡からの予想と異なる実験結果が偏光ラマン散乱測定で得られ、その整合性を確認するために2日目では計測が終わらず、一部の実験は3日目に持ち越されました。夜は、食事をしながら実験結果や分域・結晶の対称性に関する議論が行われました。

3日目午前：実験実習の続き、データ表示・解析実習

3日目は、前日の実験の続きを実施し、必要なデータを取得しました。その後、データ処理に関するレクチャーや解析方法を紹介し、今回の実験結果を検討して正午に閉会しました。

以上のように、講義だけでなく、実習でも参加者の試料を基に様々な議論が展開され、参加者にとって実りある3日間になったと信じています。後日に参加者から「The school had a well-structured schedule that balanced lectures, practical sessions, discussions, and networking opportunities.」「The school provided practical sessions that offered valuable hands-on experience with measurement equipment, experiments, and data analysis. These sessions enhanced the skills and knowledge of the participants.」といった感想が寄せられました。



2日目や3日目のラマン分光実験の様子。

感想

ラマン分光に関するスクール開催は私にとって初めての試みであり、手探りでの実施となりました。しかし、東大の事務局(松田先生・大島さま)や参加者の協力もあって無事に終了することができました。光は非接触・非破壊で物性、特に格子ダイナミクスを探るのに非常に有効な手段です。そのため、磁場下の測定との相性が良いと考えています。今後は、電通大から可搬型パルスマグネットを島根大に送ってもらい、パルス磁場下でのラマン散乱測定環境や時分割計測環境を整えていく予定です。これらも取り入れながら、今後のラマンスクールをより充実させていくつもりです。

現在の状況では、弱い光のラマン散乱を1000テスラのパルス磁場下で測定することは、測定時間が短すぎて現実的ではありません。しかし、最新の技術を駆使しながら測定時間を短縮していき、1000テスラのパルス磁場下でのラマン散乱測定に挑戦できたらなあ…または、このスクールに参加した若手研究者が将来実現してくれたらいいなあ…なんて思っています。

A02-A03 班間連携勉強会

「p電子系の構造カスastroフィーを目指して」を開催

A03 徳永 将史 (東京大学物性研究所)



1000T 超強磁場による構造カスastroフィーを目指す候補の中に、ニクトゲンのp電子による結合が構造の鍵を握る物質が多く含まれます。カスastroフィーを実現するためにはこれらの物質の構造を支配するp電子によるボンドの形成や乖離の根拠的理解が重要です。そこでA02班とA03班は以下のプログラムで班間連携勉強会「p電子系の構造カスastroフィーを目指して」を開催しました。

開催日：2023年7月10日(月)

場所：大阪大学理学部 H棟4階 H413 + オンライン

13:00	伏屋 雄紀 (電通大)	単体ニクトゲンの物質構造論
14:00	酒井 英明 (阪大理)	ニクトゲン二次元シートを持つ物質の構造と電気伝導
15:00-15:30	break	
15:30	野原 実 (広島大)	ニクトゲンおよびカルコゲンの結晶化学と電子状態
16:30-17:00	総合討論1	p電子系の化学結合を如何に制御するか
18:30-19:30	総合討論2	化学結合と磁場の関係を如何に理解するか
19:45-20:45	総合討論3	1000T 級磁場による構造壊変に向けて

各講演では、単体ニクトゲン、IV-VI 族半導体、AMn(Bi,Sb)₂、TrCr₂Si₂ 型ニクタイトなどを中心にp電子ボンド形成の基礎が解説され、それをもとにした活発な議論が行われました。



学術変革領域研究(A) 1000テスラ科学

若手勉強会「自分の研究×Hoffmann」 in 熱海 大野屋 2024.3.29-30

石井 裕人 (東京大学物性研究所・松田康弘研究室 A01)



池田 (電通大)、石井 (物性研)、山田 (電通大)、近藤 (物性研)、林 (北大、NIMS)、加藤 (京大)、松本 (広島大)、長瀬 (広島大) の8人で学変 (A)1000 テスラ科学勉強会を行いました。今回の勉強会のテーマは「自分の研究× Hoffmann」です。

このメンバーは、教科書 Solids and Surface -A Chemical's View of Bonding in Extended Structures- (by Rold Hoffmann) を毎週ズームで集まって輪読しているメンバーです。輪読をしている中で、Hoffmannの「物理と化学の橋渡し」的な考えを自分たちの研究に実際に活かしてみることで、本領域の「化学的カテゴリー」という大目標にも近づけるのではないかと発想が生まれました。そして、それらをより具体的な内容に落とし込み、共有するべく、電通大の池田助教を中心にメンバー全員で本勉強会を企画しました。発表会では、実際に自分たちの研究に対して、Hoffmannで学んだことを活かしたこれまでにない切り口から考察が行われ、それについて非常に自由に活発な議論が行われました。また、北海道～広島という非常に広い範囲の若手と学生の交流も大変深まり、今後の共同研究の広がりも期待できます。



体験ワークショップ「パルス強磁場ミニバンクを作ろう！」の開催報告

A02 池田 暁彦 (電気通信大学)



本領域では強力な磁場である1000テスラ強磁場が誘起する新現象、特に物質の化学状態の変更という大きな目標が掲げられています。化学反応のエネルギースケール (数eV) からすると、外部磁場が与える影響は限定的です。本領域では、されど1000テスラということで、多様な試みがなされつつあり、この探索が進むことがこの領域の楽しみの一つです。一方で、1000テスラ実験は磁場発生と物性計測の両方が強い技術制約を持っているのも特徴で、ぼんぼん磁場をかけるわけにもいきません。本当は1000テスラをポンポンかけられれば、それでどんどん実験して、バンバン発見がなされるということを目指しています。それを願ってやまないのですが、実際は原理的に1000テスラをぼんぼんかけることは出来ないので、限られたチャンスで、どかーんとかけるということになっています。1000テスラかけると、コイルもサンプルも測定系も消失しますが、うまくいけばデータが残ります。

1000テスラはマイクロ秒しか持続しないパルス磁場であるという点も重要で、定常磁場とは異なる点が多くあります。この

ためパルス磁場をかける実験経験や感覚がないと、想像の延長上に1000テスラ実験を持つことが出来ません。感覚もつかめません。そこで本領域では1000テスラと言わず40テスラ、20テスラでいいのでパルス磁場発生装置を複数作り、パルス実験を気軽に経験、テスト、検証できるようにしようという計画を立てていました。これらはミリ秒のパルス磁場ですが、従来はミリ秒のパルス磁場でも専用の施設に行って利用するものですので、そのハードルを大きく下げようということです。

実際に電気通信大学で2度のワークショップを開きました。

第1回「強磁場ミニバンクを作ろう！」
～組み立てて学ぶ、ポータブルパルス磁場発生装置の仕組み～
日時 2023年11月13-17日
参加人数 30～40人 (全国の大学の、教授から学生まで)
内容 実物の見本を見ながら、パルス磁場発生装置を8台組み立てる



第2回「40テスラ強磁場ミニバンクを立ち上げよう！

+ミニコイルを作ろう！」

日時 2024年3月25-26日

参加人数 10名(強磁場界隈の若手研究者たち)

内容 前回組み立てたパルス磁場発生装置の高電圧テスト・放電テストを行う。強磁場発生ミニコイルを製作する。

現在までに電気通信大学で製作した強磁場発生装置は11台になり、電通大での利用に加え、すでに下記のサイトに設置され磁場発生を開始しています。

- 京都大学(米澤Gr) 1000テスラ磁気光学計測の開発
- 島根大学(塚田Gr) パルス磁場ラマン分光の開発
- 関西光量子科学研究所(J-Karen) 相対論的プラズマと磁場の相互作用
- SACLA(ハイパワーレーザービームライン) レーザープラズマと磁場の相互作用
- 東大物性研(松永Gr) 高繰り返しレーザーと組み合わせる高繰り返しACパルス磁場実験

今後これらのミニ装置を利用した新実験領域開拓が進むことを期待しております。

装置の特徴は下記のような点にあると思います。

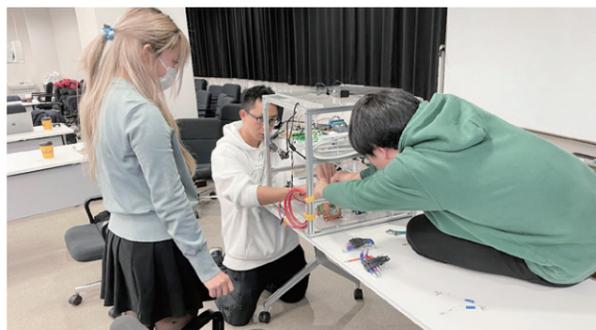
- 野尻先生の記事と松田先生の制作メモを見て学び、基本設計は踏襲した。
- 細かいところは自分で考えて工夫して作った。
- 今まで以上にシンプル設計、低予算、軽量で作れた。
- ビルド済みを配ることができる。(強磁場未経験者でも導入可能)
- 作り方を全てオープンにした。(強磁場経験者なら自作可)
- 初心者でも作れる、使える。

結果いいところ

- パルス磁場に関わる、これから関わる若手研究者の育成
- 大学での基礎教育にも使える
- ガチ研究にももちろん使える
- 新しい研究に専有させることができる
- 一風変わったアイデアも試せる。
- 複数のバンクを組み合わせた実験も気軽に試せる。
- 大型装置に比べて、開発や工夫のスピードが桁違いに速くできる。
- 学生一人でも全体を把握でき、一人で操作できるようになる。

以上のように、本装置は大発明ではないかもしれませんが、実際上かなり意味のある装置なのではないかと感じています。みなさま、ぜひ利用を検討していただけると幸いです。

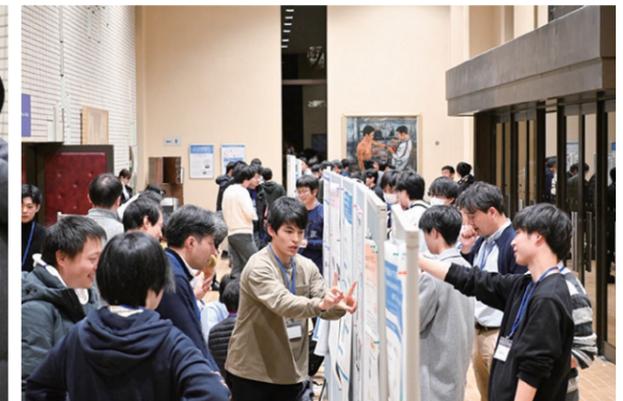
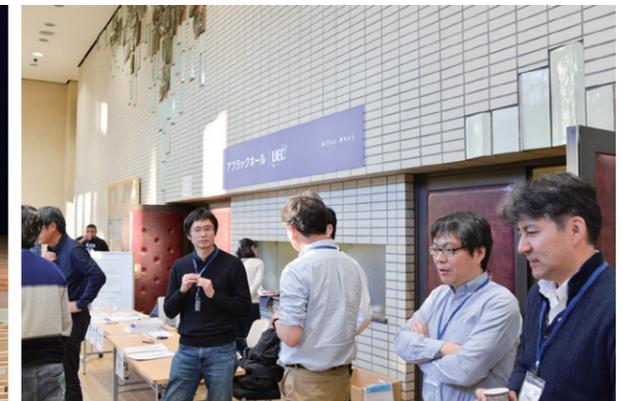
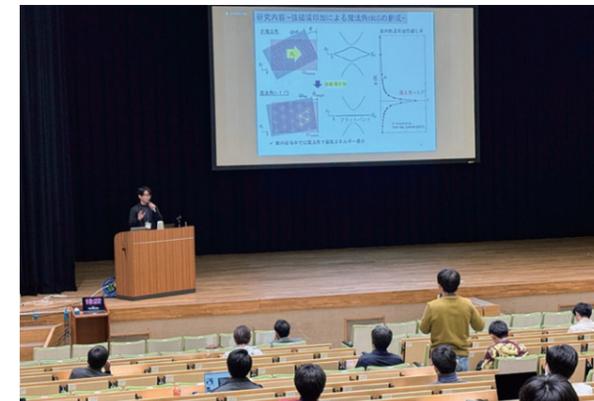
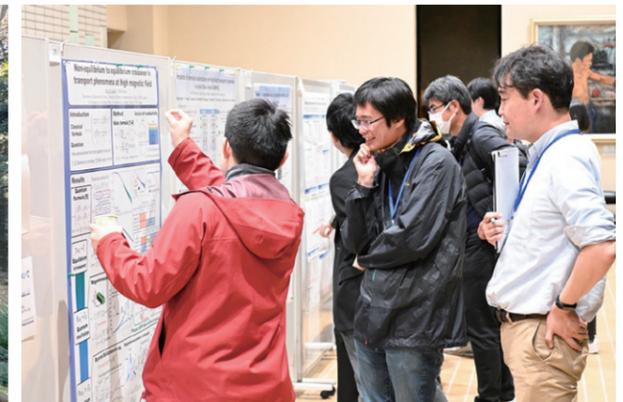
[1] 池田暁彦、「パルス強磁場を作っちゃおう！」 固体物理 59(6), 303 (2024)
 [2] A. Ikeda, K. Noda, K. Shimbori, K. Seki, D. Bhoi, A. Ishita, J. Nakamura, K. Matsubayashi, K. Akiba, "A concise 40 T pulse magnet for condensed matter experiments" J. Appl. Phys. 136, 175902 (2024) (Open Access)



第2回領域会議の開催報告

2023年12月4日から6日にかけて電気通信大学アフラックホールにおいて第2回領域会議が開催されました。計画研究の代表分担者から27件の発表、および、若手・学生から29件のポスター発表がありました。2回目の領域会議でしたが、領域に参加する異なる分野の研究者が徐々に歩み寄り相互理解を深めることが出来たと思います。ポスター発表の優秀発表賞は京大の山根聡一郎さん(Gold Prize)、京大の川淵悟朗さん(Silver Prize)、東大の近藤雅起さん(Silver Prize)に授

与されました。また3日目には国際セッションがあり、Sergei Zhelitsynさん(HZDR ドイツ国立強磁場研)、Oliver Portugallさん(フランス強磁場研 LNCMI-CNRS)、Junichiro Konoさん(ライス大学、アメリカ)から各国の強磁場施設や強磁場テラヘルツ実験の先端事情をご紹介いただき、宮田敦彦さん、野村肇宏さんからヨーロッパでの研究キャリアについてご紹介いただきました。





第3回領域会議の開催報告

2024年4月19日から21日にかけて、京都大学(桂キャンパス) 桂ホール/A2-306 大教室にて第3回領域会議が開催されました。計画研究と公募研究に関する約40件の口頭発表がありました。公募研究を加えた初の領域会議で、多様な新1000テスラ研究の展開を予感させる有意義な会となりました。

また、41件のポスター発表がありました。ポスター発表の優秀発表賞は理研の厳正輝さん (Gold Prize)、名古屋大の井口寛太さん (Silver Prize)、電気通信大の山田暉馨さん (Silver Prize)、名古屋大の大橋翼さん (Silver Prize) に与与されました。

